INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



RADAR ORIENTADO ELECTRONICAMENTE

Abril 1985

400 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 103
Abril 1985

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Isabel García Acha y Julio R. Villanueva: *Así cambia* Trypanosoma *su cubierta*; Fernando Moreno Insertis: *Fuentes explosivas de rayos gamma*; David Jou: *El movimiento browniano*; Joandomènec Ros: *Exito reproductor en el ciervo común*; Manuel Puigcerver: *Radares de barrido electrónico*; Pere Abelló Vila: *Sustitución funcional del oído*; Rafael L. Felip: *Aceros de Damasco*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Luis Cornudella y Joaquim Maluquer

Libros:

Albert Bramon, Antonio Lafuente, Bernat Ancochea y J. Cuello



LA PORTADA

El dibujo de la portada ofrece una perspectiva a lo largo de una de las dos caras de 33 metros de lado del PAVE PAWS, un radar de alerta temprana orientado electrónicamente y construido por la compañía Raytheon. El PAVE PAWS es un ejemplo de la tecnología de radares de barrido electrónico (véase el artículo de Eli Brookner, en este número). Las señales de microondas emitidas por los 1792 elementos activos de antena en la cara de los 5354 elementos del dispositivo interfieren constructivamente para producir el haz. Aunque la dirección del haz puede alterarse hasta 60 grados respecto a la perpendicular a la cara de la agrupación, la antena permanece inmóvil. Se introducen retrasos, calculados uno a uno, en las señales radiadas por cada elemento. La demora altera las fases de las señales, una respecto a la otra, y se interfieren constructivamente para un ángulo especificado con relación a la perpendicular a la cara del dispositivo. Cada elemento, de 20 cm, está formado por dipolos que se cruzan.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 4400 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ian Worpole

Página	Fuente
7	Gloria Soberón
8-13	Ricardo Génova y Gloria Soberón
15	Steven T. Brentano, Universidad de Iowa (*arriba*); Klaus M. Esser, Instituto de Investigación Walter Reed del Ejército de los Estados Unidos (*abajo*)
16	Edgar D. Rowton, Instituto de Investigación Walter Reed del Ejército de los Estados Unidos (*arriba*); Patricia J. Wynne (*abajo*)
17	Laurence Tetley y Keith Vickerman, Universidad de Glasgow
18-19	Ilil Arbel
20	Don. C. Wiley, Universidad de Harvard
21	Ilil Arbel
25	Hank Iken, Walken Graphics
26	Hank Iken, Walken Graphics (*arriba*); H. Pedersen, ESO/ Observatorio La Silla (*abajo*)
27-29	Hank Iken, Walken Graphics
30	Harvard College Observatory
33	J. Maluquer Sostres
37-44	George V. Kelvin
47	T. H. Clutton-Brock, Universidad de Cambridge
48	Andrew Tomko
49-56	Patricia J. Wynne
59	Eli Brookner (*arriba*); Raytheon Company (*abajo*)
60-66	Jerome Kuhl
68-69	Tom Prentiss
70	Quesada/Burke
71-74	Tom Prentiss
77	Quesada/Burke (*arriba y centro*); Rosemarie Koch (*abajo*)
78	Michael Goodman
79	Ilil Arbel
80	Oleg D. Sherby y Jeffrey Wadsworth
82	Ilil Arbel
84-88	Edward Bell
91-94	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

GLORIA SOBERON CHAVEZ ("Mecanismos de nodulación de las leguminosas") enseña genética molecular en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en donde se graduó en investigación biomédica básica. Presta sus servicios en el Centro de Investigación sobre Fijación del Nitrógeno del mismo centro superior, en el campo de la genética molecular de *Rhizobium phaseoli*.

JOHN E. DONELSON y MERVYN J. TURNER ("Así cambia *Trypanosoma* su cubierta") son, respectivamente, profesor de bioquímica de la Universidad de Iowa y miembro del Instituto Molteno del Consejo de Investigaciones Médicas de la Universidad de Cambridge. Donelson se licenció en ciencias por la Universidad de Iowa, doctorándose en bioquímica por la de Cornell. En 1974, después de realizar trabajos postdoctorales en Cambridge y en la Universidad de Stanford, fue contratado por la Universidad de Iowa. Su interés por las enfermedades tropicales provocadas por parásitos arranca de una estancia en Ghana como voluntario del Cuerpo de la Paz, acabado su primer ciclo universitario. Su empeño en esa causa le llevó de nuevo al extranjero en 1980, como científico visitante del Laboratorio Internacional para la Investigación de Enfermedades Animales, con sede en Kenia. Donelson ocupa actualmente la plaza Borroughs-Wellcome de parasitología molecular. Turner se licenció por la Universidad de Sheffield, por la que se recibió de doctor en química orgánica en 1970. Investigó sobre la bioquímica de las proteínas de la membrana, siendo becario postdoctoral de la Universidad de Harvard, de 1971 a 1974, y luego en el Hospital Reina Victoria de Londres (de 1974 a 1977). Desde ese último año ocupa el cargo antedicho en el Instituto Molteno.

BRADLEY E. SCHAEFER ("Fuentes explosivas de rayos gamma") investiga en el laboratorio de astrofísica de altas energías del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de Greenbelt, Maryland. Formado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, por el que se doctoró en física en 1983, trabajó durante un año en la Universidad de California en Berkeley. Además del tema sobre el que versa su artículo, Schaefer se interesa por las estrellas variables cataclísmicas y por la historia de la astronomía china antigua. En su tiempo libre juega al ajedrez, deporte en el que ha alcanzado hace poco la categoría de experto.

BERNARD H. LAVENDA ("El movimiento browniano") enseña química física en la Universidad de Camerino. Estudió química en la Universidad Clark de Massachussets, en el Instituto Weizmann de Ciencias de Israel y en la Universidad Libre de Bruselas, por la que se doctoró en 1970. Tras una estancia postdoctoral de dos años en la Universidad Hebrea de Jerusalén, impartió cursos en las universidades de Pisa y Nápoles. Lavenda ingresó en el claustro docente de Camerino en 1980.

T. H. CLUTTON-BROCK ("Exito reproductor en el ciervo común") goza de una beca de la Royal Society para trabajar en el departamento de zoología de la Universidad de Cambridge, institución en la que se formó, y por la que se recibió de doctor, en 1972, con una tesis sobre la ecología y el sistema de reproducción de los monos colobos rojos. En 1976, tras una estancia de un año en la Universidad de Oxford, en calidad de becario de investigación, y tres más en la de Sussex, como profesor de etología, volvió a Cambridge para incorporarse al Grupo de Sociobiología del King's College. En 1980 Clutton-Brock fundó un grupo de investigación de grandes animales integrado en el departamento de zoología de Cambridge.

ELI BROOKNER ("Radares de barrido electrónico") es científico consultor de la división de equipos de la compañía Raytheon de Wayland, Massachusetts. Completó su primer ciclo universitario en ingeniería eléctrica en el City College de Nueva York, en 1953, e ingresó en los laboratorios de investigación electrónica de la Universidad de Columbia, donde tomó parte en estudios de ruido en microondas y en el proyecto de radares de largo alcance. En él permaneció hasta 1962, salvo el trienio 1957-60, durante el cual trabajó de ingeniero proyectista en la Corporación Científica Federal de Nueva York. Simultaneando sus estudios en Columbia, se licenció en ciencias en 1955, doctorándose en 1962. Ese mismo año, Brookner ingresó en Raytheon, donde ha colaborado en el desarrollo de numerosos radares de defensa y ha participado en estudios de sistemas de radar con base en el espacio.

GERALD E. LOEB ("Sustitución funcional del oído") es investigador del laboratorio de control nervioso que el Instituto Nacional de Trastornos Nerviosos y de la Comunicación y Apoplejía (NINCDS) tiene en Bethesda. Se licenció en biología humana por la Universidad Johns Hopkins, en 1969, y, en medicina, en 1972. En ese centro comenzó su carrera investigadora adscrito al departamento de biofísica; fue jefe de equipo en un estudio de biomateriales e investigador invitado en un proyecto de diseño de ojo artificial desarrollado en la Universidad de Utah. De 1972 a 1973 lo encontramos de interno de cirugía en la Facultad de Medicina de la Universidad de Arizona; en 1973 se incorporó al NINCDS. Loeb preside la compañía Biomed Concepts.

OLEG D. SHERBY y JEFFREY WADSWORTH ("Aceros de Damasco") son, el primero, profesor de ciencia de los materiales e ingeniería de la Universidad de Stanford y, el segundo, director del Laboratorio de Investigación Lockheed de Palo Alto, California. Sherby se licenció por la Universidad de California en Berkeley, que le otorgó el doctorado en física en 1956. Tras siete años de investigación en metalurgia en el Instituto de Ingeniería de Berkeley, estuvo dos en Inglaterra, trabajando, primero, como becario postdoctoral en la Universidad de Sheffield y, más tarde, como oficial de enlace de la Oficina de Investigación Naval de los Estados Unidos. Stanford le contrató en 1958. El interés científico de Sherby se centra en la conducta mecánica, los fenómenos de difusión y el procesado de los materiales. Wadsworth es doctor en física por Sheffield. En 1976 fue nombrado investigador asociado de Stanford; mantiene su relación con esa universidad en calidad de profesor consultor asociado. En Lockheed, donde trabaja desde 1980, desarrolla aleaciones de aluminio superplástico y metales termorresistentes para su utilización en aviación y estructuras aeroespaciales.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Se publicó en Venecia la traducción italiana del *Tractado de las drogas y medicinas de las Indias Orientales*, de Cristóbal de Acosta, con el título de *Trattado della historia, natura, et virtù delle droghe medicinali, et altri semplici rarissimi, che vengano portati dalle Indie Orientali in Europa*.

Cristóbal Acosta nació hacia 1525 en San Buenaventura, localidad de las islas de Cabo Verde, en el seno de una familia judeoconversa ligada al imperio colonial portugués en Africa y siempre se tituló "Africano". En la década de los años cincuenta estuvo por vez primera en la India, donde participó como soldado en varias acciones bélicas y conoció a García de Orta, el gran estudioso de la materia médica oriental. En 1568 volvió de nuevo a la India como médico de Luis de Ataide, su antiguo capitán, que había sido nombrado virrey. Había estudiado artes y medicina en una universidad castellana, probablemente Salamanca. Esta vez, llegó a Goa pocos meses después de la muerte de Orta. Trabajó como médico en el hospital de Cochin y viajó por diversas zonas de la India y del Asia Oriental hasta que terminó el mandato virreinal de Ataide en 1572. De regreso a nuestra península, acabó afincándose en Burgos, ciudad en la que permaneció desde 1576 hasta 1587, primero como cirujano y luego como médico contratado por el municipio. Tras la muerte de su mujer, una crisis religiosa le llevó a retirarse a Nuestra Señora de la Peña, junto a Tharsis, en la actual provincia de Huelva, donde murió después de 1592.

En 1578, publicó en Burgos el *Tractado de las drogas y medicinas de las Indias Orientales*, que dedicó a la ciudad. Acosta reconoce ampliamente los méritos de García de Orta y su deuda con él, hasta el punto de que puso como subtítulo la frase: "En el cual se verifica mucho de lo que escribió el Doctor García de Orta". Su obra, sin embargo, es en buena parte original. Comienza tratando de la canela, la pimienta blanca y negra, el clavo y la nuez moscada, y termina con el opio, al que dedica un amplio capítulo que incluye un excelente estudio de la toxicomanía. En total, estudia 69 plantas medicinales y drogas, algunas de las cuales no habían sido mencionadas por García de Orta. En casi todas ellas ofrece una amplia sinonimia en los idiomas peninsulares (castellano, portugués, catalán y vasco), en los más importantes de la Europa occidental (italiano, francés, inglés, alemán y flamenco) y en varias lenguas del Lejano y del Próximo Oriente. Las descripciones son muy minuciosas, lo mismo que las figuras, "dibujadas al vivo", que fueron las primeras publicadas en Europa sobre plantas del Asia oriental. Se ocupa también de los lugares de procedencia de cada planta o droga, de su recolección y conservación, así como de sus posibles adulteraciones. El libro incluye un curioso estudio sobre el elefante, que asocia excelentes datos de observación a pintorescas ideas de origen clásico o medieval.

Como ejemplo del contenido del libro de Acosta, véase el estudio que dedica al gengibre:

"El gengibre, llamado de los latinos, *zingiberis*; de los árabes, parsios y turcos, *ginzibil*; los guzarates, decanins y bengalas, cuando es verde, le llaman *adrac* y cuando seco, *suete*; los malabares, en verde y seco, *ingi*; los malayos *aljaa*; los catalanes, *gingebre*; italianos, *gengevo*; franceses, *gingembre*; tudescos, *Ingber*; portugueses, *gengibre*.

"Es de tres hasta cuatro palmos de alto, tiene las hojas muy semejantes a las de la llamada *Lacryma Job, seu millium solis*; el caule es del grossor del *Asphodelus, seu hastula regia*. Es todo hecho de un ajuntamiento de hojas, de manera que paresce a unas pequeñas cañas verdes. Las raíces son casi semejantes a las del lirio cárdeno o iris. Nasce este gengibre en muy grande abundancia por todas las Indias Orientales, como en Bengala, en Dabul, en Bazain y en todo el Malabar, a donde es la mayor cantidad. El mejor nasce de simiente y de raíz, como quiera que lo siembren, y de suyo sin se sembrar nasce en muchas partes, mas no mucho por la tierra adentro, sino en los lugares más vecinos a la mar. Este gengibre está todo el año verde y para lo guardar lo cogen en deciembre y en enero y lo secan y cubren de barro, para le tapar los poros y agujeros que tiene, por los cuales se corrompe con facilidad, y también porque con el barro está más reciente y su humedad más conservada y más preservado del gusano. Gustándolo en verde, quema en la boca muy poco y se siente mucho menos que el seco, y cuanto el sitio es más húmedo donde nasce, tanto es él menos agudo, y cuanto más seco, más quema. Usan dél en los principios de la mesa, verde hecho en ensalada, y allende de ser apetitoso, ablanda el vientre y, por otra parte, retiene las cámaras causadas por indigestión. Hacen de esta raíz conserva de azúcar, picándola primero muy bien y infundiéndola en muchas aguas para que sea más dulce. Y déste, el que es cogido en sazón y bien curado y preparado primero que lo cuezan en el azúcar, es muy bueno y muy sabroso y tierno al comer; y el que deja hilos en la boca y amarga, es muy malo.

"Serapio le llama *lingibil*, mas está el nombre corrupto. A lo que dice Galeno que viene de la Barbaria, si por Barbaria entendió Galeno región extraña, dijo bien. Dioscórides dijo que lo hay en la Tragoldita y en la Arabia, y que en las Islas del Comaro se halla, que son confines a aquesta tierra, y en la Etiopía muy poco; mas en lo que dice que lo hay en la Arabia, se engañó, porque no lo hay allí y es mercaduría que va para allá. Dice más Dioscórides, libro 2, capítulo 149, que las raíces del gengibre son pequeñas como las del cipero o juncia, mas no son así, sino como están figuradas. Y no hay para qué vituperar ni desechar el que está cubierto de barro, diciendo que por agujerado, malo y podrido lo embarraron; porque no lo cubrieron de barro por estas causas ni por pesar más, sino para lo conservar mejor, como está dicho."

La difusión del *Tractado* de Acosta fue muy amplia. La traducción latina, resumida y con comentarios de Charles de l'Escluse o Clusius, apareció a los cuatro años de la edición castellana original y fue reimpresa varias veces. En 1585, como hemos dicho apareció una traducción italiana y en 1602 una francesa.

En 1592, Acosta publicó dos volúmenes sobre temas morales y religiosos: el *Tractado en loor de las mugeres* y el *Tratado en contra, y pro de la vida solitaria. Con otros dos tratados, uno de la Religion, y Religioso. Otro contra los hombres que mal viven*. Por el contrario, quedaron inéditos sus materiales sobre "las yerbas, plantas, frutos, aves y animales, así terrenos como acuátiles, que en aquellas partes (la India), y en la Persia, y en la China hay", que planeó exponer en una obra más amplia y sistemática que su *Tractado* de 1578.

Algunas de las figuras "dibujadas al vivo" del Tractado *de Cristóbal de Acosta, las primeras publicadas en Europa sobre plantas del Asia Oriental*



Clavo del Archipiélago de la Banda (*Eugenia aromatica* Berg)



Nuez moscada de las Molucas (*Myristica moschata* Thumb.)



Datura (*Datura fastuosa L.*)



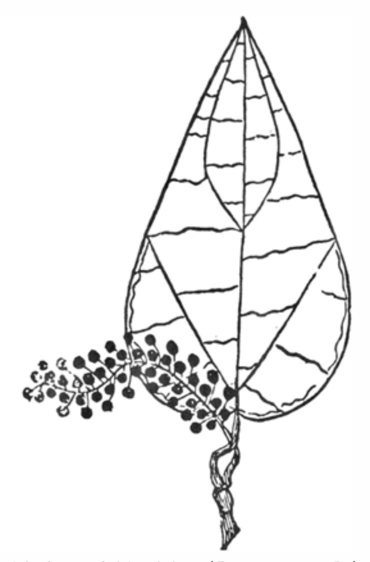
Canelo de Ceilán (*Cinnamomum Ceylanicum* Nees)



Gengibre (*Zingiber officinale* Rosc.)



Cálamo aromático o ácoro (*Acorus calamus* L.)



Pimienta del Malabar (*Piper nigrum* L.)



Aloe de Socotora (*Aloe succotrina* Lam.)



El elefante de la India (*Elephas maximus*), según otro grabado del libro de Acosta

Mecanismo de nodulación de las leguminosas

La investigación genética de Rhizobium *ha permitido avanzar en el estudio del mecanismo de nodulación de las leguminosas y de la dinámica de la población de estas bacterias en el suelo*

Gloria Soberón

Todos los seres vivos requieren una fuente nitrogenada para crecer, ya que los principales componentes celulares, como las proteínas y los ácidos nucleicos, contienen nitrógeno. Varían, sin embargo, los compuestos nitrogenados que los distintos organismos son capaces de asimilar; las plantas utilizan compuestos inorgánicos, como amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-); los animales superiores, además de amonio, requieren compuestos orgánicos, como aminoácidos o bases nitrogenadas.

En última instancia, todos los compuestos nitrogenados que los seres vivos utilizan provienen del nitrógeno molecular (N_2), que representa el 80 por ciento de los gases que forman la atmósfera terrestre. Los únicos organismos capaces de utilizar directamente este elemento son las bacterias fijadoras de nitrógeno. Los demás dependen del metabolismo de estos microorganismos para tener una fuente nitrogenada. Dichas bacterias asimilan el nitrógeno molecular por medio de la enzima nitrogenasa, proteína que cataliza la conversión de nitrógeno en amonio hidrolizando adenosín trifosfato (ATP).

En la mayoría de los habitats del planeta, la productividad biológica está limitada por la disponibilidad de una fuente nitrogenada, de modo que si se aumentara la fijación de nitrógeno aumentaría la biomasa del ecosistema. La disponibilidad de amonio o nitrato en el suelo condiciona también el crecimiento de muchas plantas cultivadas por el hombre, que han de fertilizarse para aumentar los rendimientos.

Los fertilizantes nitrogenados que se utilizan en la agricultura se sintetizan a partir de nitrógeno atmosférico; este proceso requiere de alta presión y temperatura, que se alcanzan a expensas de combustibles derivados del petróleo. Si los requerimientos de las plantas pudieran satisfacerse directamente por la fijación biológica de nitrógeno habría un ahorro de combustible y se sustituirían los recursos naturales no renovables por la energía derivada, en última instancia, del sol.

El poder acoplar la fijación de nitrógeno con su asimilación por plantas de importancia económica es un objetivo muy prometedor, aunque todavía lejano. Un enfoque que puede proporcionar información valiosa para provocar la interrelación entre las bacterias fijadoras de nitrógeno y plantas cultivadas es el de estudiar las soluciones que se han seleccionado en la naturaleza. Hasta el momento, la relación mejor estudiada es la simbiosis que se establece entre bacterias del género *Rhizobium* y algunas leguminosas.

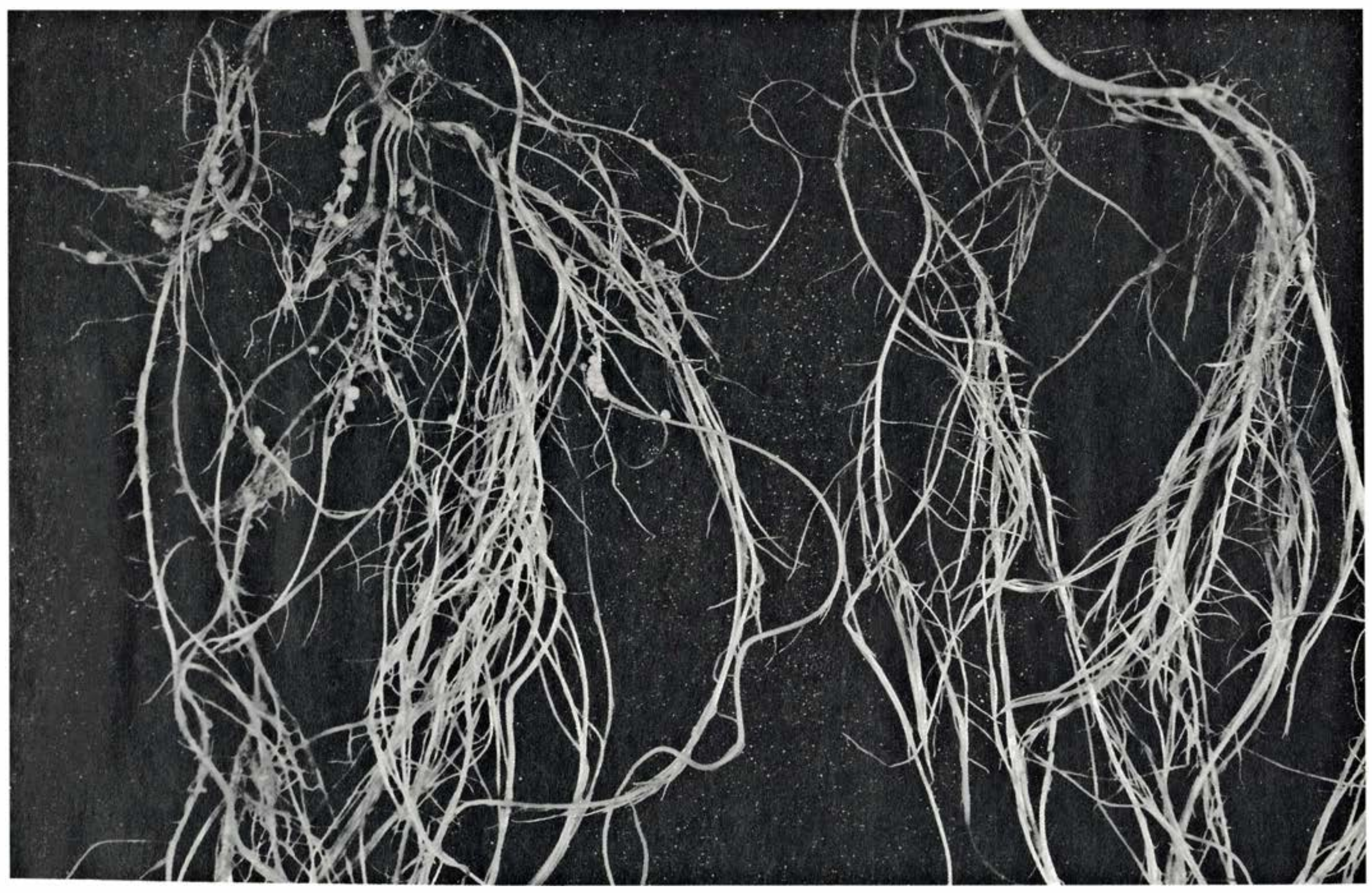
Las bacterias del género *Rhizobium* son habitantes naturales del suelo que infectan las raíces de ciertas leguminosas. Al llevarse a cabo esta infección, se desarrollan unas estructuras denominadas nódulos, donde las bacterias se dividen y fijan nitrógeno. La especie a la que pertenece un cierto *Rhizobium* se define por la especie de la planta que nodula y en la que es capaz de fijar nitrógeno; así pues, la bacteria que se asocia con el guisante se conoce como *Rhizobium leguminosarum* y, la que lo hace con el trébol, *Rhizobium trifolii*, etcétera.

El nódulo está formado por tejido de la planta. Algunas de las células que lo constituyen contienen bacterias englobadas en membranas dentro de su citoplasma; estas bacterias atraviesan un proceso de diferenciación y es precisamente la forma diferenciada (bacteroide) la que fija el nitrógeno. El bacteroide es mayor que la bacteria, posee una forma irregular y se muestra más sensible a cambios de presión osmótica.

El nódulo viene a ser, pues, un órgano producto de la simbiosis, encargado de la fijación de nitrógeno y la asimilación de este elemento. A los nódulos llegan carbohidratos producto de la fotosíntesis; de ellos se exporta a las estructuras superiores de la planta el nitrógeno fijado por el bacteroide y transformado en el citoplasma de la célula vegetal en compuestos orgánicos nitrogenados, como aminoácidos o derivados de bases nitrogenadas. De este modo, el nitrógeno requerido para el crecimiento de la planta lo aporta la bacteria; la leguminosa proporciona la energía necesaria para la actividad de la nitrogenasa y para el mantenimiento del nódulo.

Cuando se cultiva una leguminosa, el número de *Rhizobia* presentes en el suelo capaces de nodularla aumenta en varios órdenes de magnitud, lo que muestra que el *Rhizobium* específico se beneficia de la presencia de su planta hospedadora; se desconoce, sin embargo, el mecanismo responsable de que esto suceda. Es poco probable que las bacterias que forman los nódulos y se convierten en bacteroides aumenten en número, pues el bacteroide es mucho más frágil que la bacteria y no parece regresar a su forma original. Otra expli-

1. LA INTERACCION DE *RHIZOBIUM PHASEOLI* con la raíz de fríjol tiene como resultado la formación de nódulos en los que se lleva a cabo la fijación del nitrógeno (*abajo*). Arriba se ofrece una micrografía obtenida por Federico Sánchez, del Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno, en la que se pueden apreciar una célula infectada que contiene bacteroides y células no infectadas. La raíz del fríjol de la izquierda, abajo, corresponde a una planta inoculada con una cepa silvestre de *R. phaseoli*; a la derecha, otra planta inoculada con la misma cepa después de un tratamiento que elimina plásmidos.



cación podría ser que la fracción de la población de *Rhizobium* que no infecta a la planta se dividiera en presencia de ésta; pero esto podría producir que se amplificara la información más ineficaz para la simbiosis, pues serían las bacterias que no forman nódulos las que se desarrollarían. Como se verá más adelante, este fenómeno podría justificarse atendiendo a la reordenación de los plásmidos, que portan la información de *Rhizobium* que participa en la simbiosis con la leguminosa.

Según se ha establecido, la información genética que determina que *Rhizobium* sea capaz de infectar específicamente una leguminosa y fijar nitrógeno en asociación con ella está codificada en ciertas moléculas de ADN extracromosómico conocidas como plásmidos.

Los primeros datos al respecto los aportó, en 1967, S. Higashi, de la Universidad de Tokyo. Demostró que la especificidad para nodular trébol se transfería por conjugación de *R. trifolii* a una cepa que originalmente nodulaba fríjol (*R. phaseoli*). Ya que la transferencia por conjugación es una característica propia de los plásmidos, este resultado demuestra que la especificidad para la nodulación está codificada en una de estas moléculas.

Más tarde se demostró la transferencia de la especificidad de nodulación entre varias especies de *Rhizobium* como *R. leguminosarum* y *R. trifolii*. Posteriormente, el grupo de R. A. Schilperrort, de la Universidad holandesa de Leiden, puso de manifiesto la transferencia de la capacidad de nodular trébol, aunque no de fijar nitrógeno, de *Rhizobium trifolii* a una cepa de *Agrobacterium tumefaciens*, que naturalmente no nodula ninguna planta. Recientemente en el Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno de la Universidad Nacional Autónoma de México, el grupo de M. Mejías y el nuestro encontramos que *Agrobacterium tumefaciens* es capaz de nodular fríjol y de fijar nitrógeno en estos nódulos al heredar ciertos plásmidos provenientes de *Rhizobium phaseoli*.

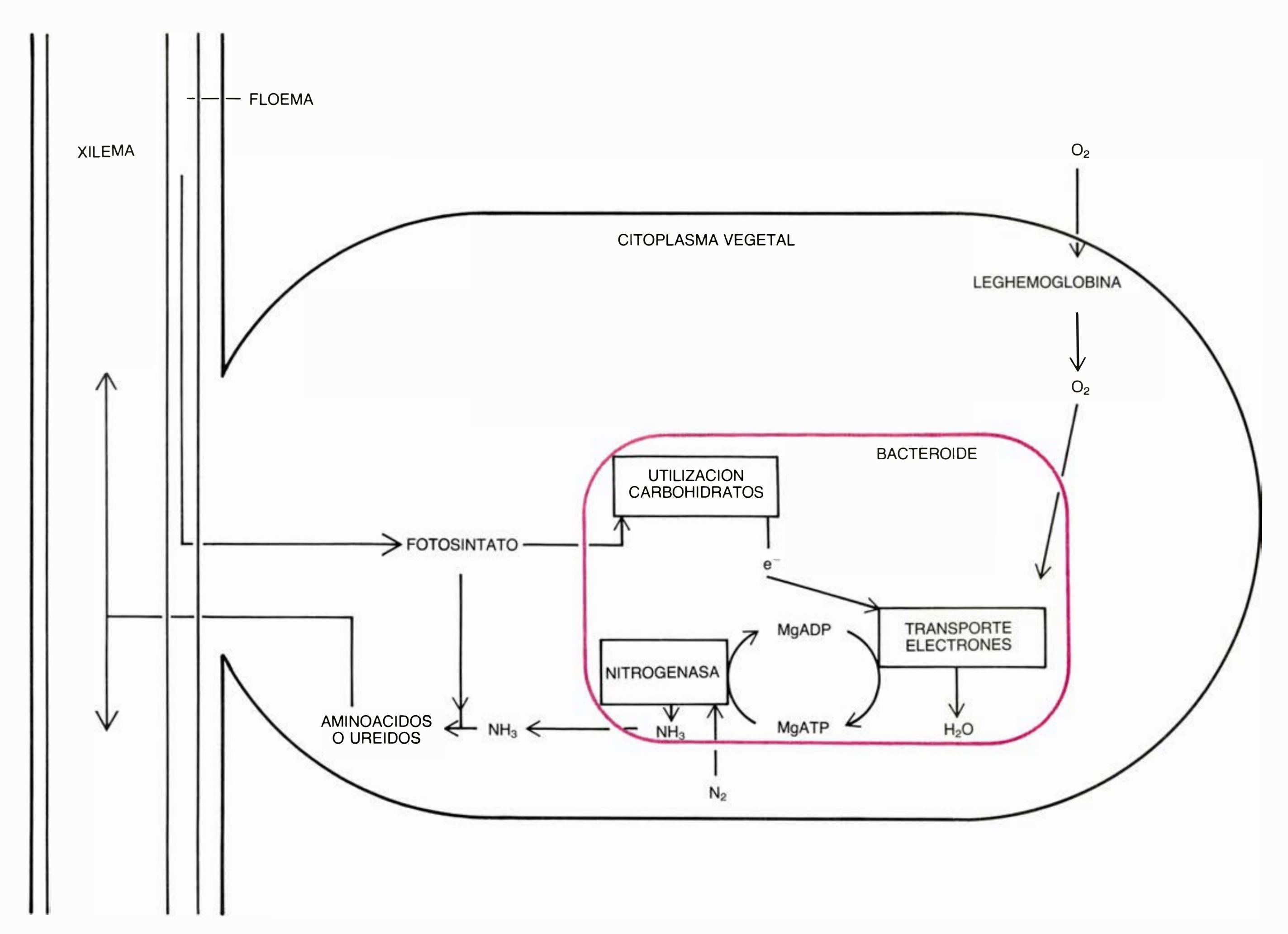
Otro enfoque experimental usado es el de tratar *Rhizobium* con agentes que eliminan plásmidos. Se ve cómo se pierde la capacidad de nodular y de fijar nitrógeno. Gracias a este enfoque W. Zurkowski, de la Universidad Nacional de Australia, ha identificado qué plásmidos llevan información para la nodulación de varias cepas de *R. trifolii*.

La obtención de mutantes defectivos en el establecimiento de la simbiosis, y su cartografía correspondiente, posibilitó localizar ese tipo de información en plásmidos. El grupo de investigación de J. Beringer y A. Johnston, del Instituto John Innes en Inglaterra, informó en 1980 que mutaciones localizadas en un plásmido transferible de *R. leguminosarum* dañaban la capacidad de nodular o de fijar nitrógeno dentro de los nódulos.

En 1976, R. Dixon, de la Universidad inglesa de Sussex, aisló en un plásmido conjugativo la región del cromosoma de *Klebsiella pneumoniae* que determina la síntesis de histidina (*his*) y los genes que participan en la fijación de nitrógeno (*nif*); al transferir este plásmido a bacterias como *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*, recibían éstas la capacidad de fijar nitrógeno.

Conocemos ya con bastante pormenor la región del cromosoma de *Klebsiella pneumoniae* que contiene los genes *nif*. Se ha identificado 17 genes, de muchos de los cuales se sabe su fun-

2. CICLO DEL NITROGENO. La fuente de nitrógeno que utilizan los distintos organismos varía; la serie de transformaciones que sufre el nitrógeno al ser asimilado constituye un ciclo. La entrada de este elemento a la biosfera depende de la conversión del nitrógeno atmosférico en amonio, proceso que recibe el nombre de fijación del nitrógeno. Sólo ciertas bacterias son capaces de usar el N_2 para desarrollarse.



3. DE LA INTERACCION entre *Rhizobium* y la raíz de una leguminosa se forma un nódulo. En él la bacteria se convierte en bacteroide y fija nitrógeno. Por su lado, la planta aporta el fotosintato para la actividad de la enzima nitrogenasa, que asimilará el amonio y proporcionará alimento a aquélla.

ción. El trabajo experimental lo han llevado adelante los grupos de investigación de la Universidad de Sussex en Inglaterra y de la Universidad de Wisconsin en los Estados Unidos. En 1977, F. Cannon y F. Ausubel clonaron toda la región *nif* de *Klebasiella pneumoniae* en plásmidos, que se encuentran en muchas copias por célula. Los 17 genes se partieron en varios fragmentos; se aislaron cinco clones independientes que venían a cubrir la región *nif* entera; en un clon de éstos se identificaron los tres genes que codifican para la enzima nitrogenasa.

F. Ausubel publicaba en 1980 que el ADN del clon que lleva los genes estructurales de la nitrogenasa de *Klebsiella pneumoniae* hibridizaba con el ADN de distintas bacterias fijadoras del nitrógeno; dentro de éstas las había de diferente linaje evolutivo: cianobacterias y clostridias; demostrábase así que la nitrogenasa era una enzima que persistía a lo largo de la evolución biológica. Las secuencias del ADN de *Rhizobium* homólogas a los genes estructurales de la nitrogenasa de *K. pneumoniae* se encuentran codificadas en plásmidos, como se ha demostrado en varias especies: *R. leguminosarum, R. trifolii, R. phaseoli* y *R. meliloti*.

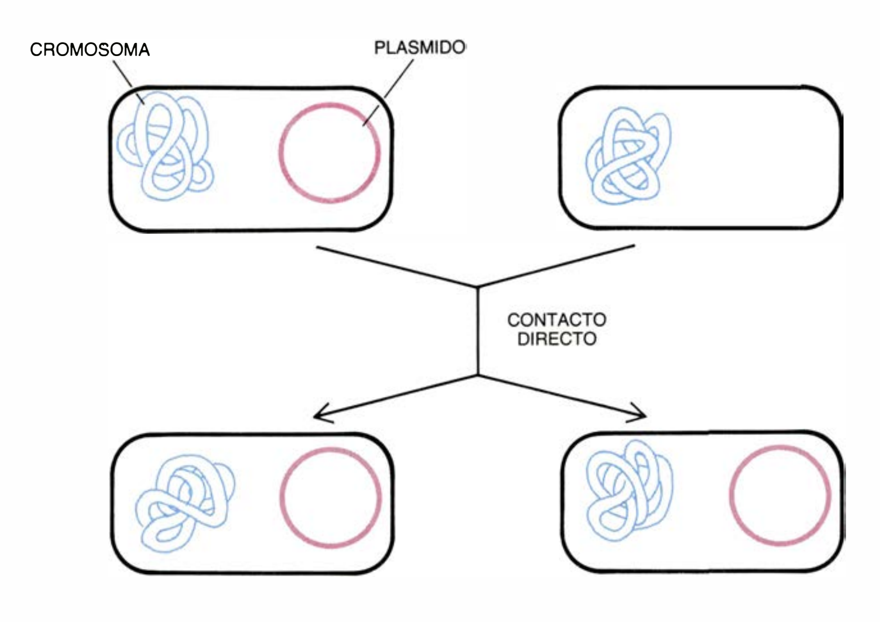
En 1982 se informó del trabajo realizado en el Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno de la Universidad Nacional Autónoma de México, según el cual se repetían las secuencias de ADN de *Rhizobium phaseoli* homólogas a los genes estructurales de la nitrogenasa de *K. pneumoniae*. Se sabe que en esta especie existen tres regiones con genes *nif*, todas codificadas en un mismo plásmido. El fenómeno de reiteraciones de genes *nif* se ha observado también en otras bacterias fijadoras de nitrógeno. No se conoce aún el significado biológico de la reiteración de estos genes.

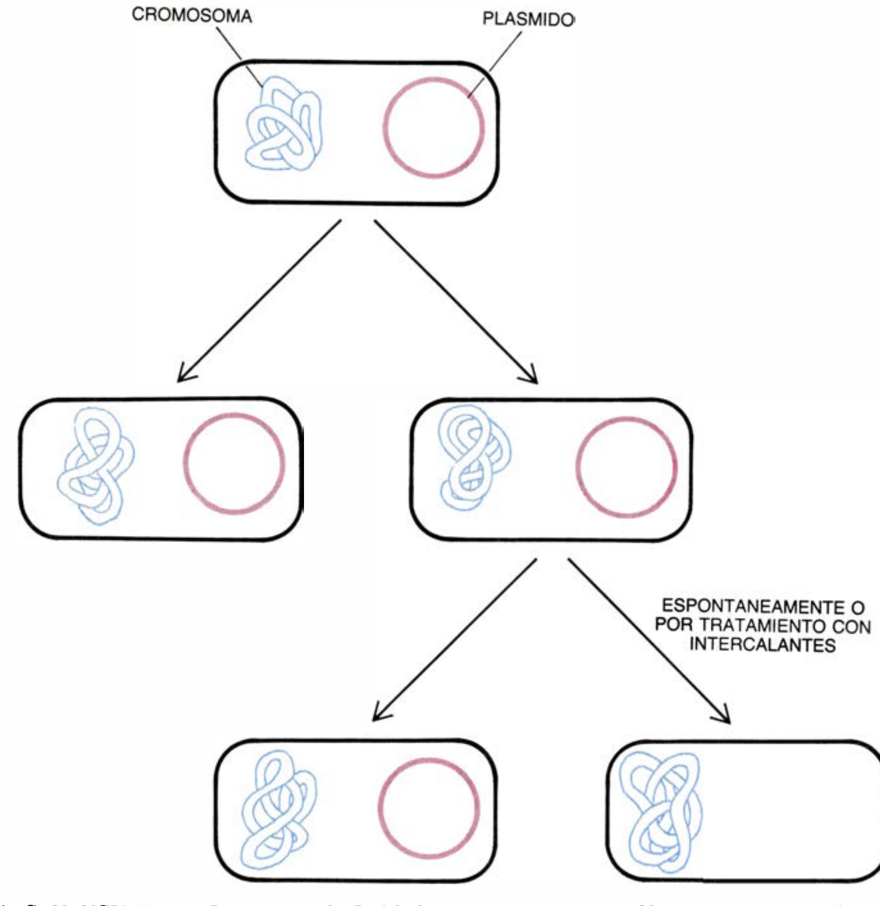
En algunas cepas de *Rhizobium* se ha demostrado que el plásmido que lleva información para la nodulación es el mismo que tiene los genes estructurales de la nitrogenasa. A este tipo de plásmidos se les denomina *Sym* (simbióticos). Recientemente se han aislado genes que están involucrados en el proceso de nodulación de algunas especies de *Rhizobium*, todos ellos presentes en el plásmido *Sym*. Este trabajo lo realizaron A. Kondorosy y S. Long con *R. meliloti* y A. Downey con *R. leguminosarum*. La identificación de los productos de estos genes podría llevar al entendimiento del proceso de modulación en un nivel molecular.

Los plásmidos son moléculas informacionales que se encuentran en la inmensa mayoría de las bacterias gram negativas. Como se verá más adelante, dadas sus características estructurales los plásmidos tienen características distintas de cualquier otro tipo de moléculas de ADN.

El primer plásmido descrito en bacterias fue el factor *F*, descubierto en los primeros años de la década de los 50 por Lederberg y Hayes al estudiar la conjugación bacteriana. Observaron que, para llevar a cabo esta transferencia, era necesario que la bacteria donadora tuviera el factor *F*; se requería, además, el contacto directo entre dos bacterias. Si el factor *F* se encontraba integrado en el cromosoma bacteriano, promovía la transferencia de genes cromosómicos, si no se transfería sólo el

mismo. En 1956, François Jacob y Wollman demostraron que el factor *F* era una molécula de ADN que se autorreplicaba y que se agregaba a la información genética bacteriana; una bacteria podía obtener, así, un plásmido por conjugación, y debía perderlo para regresar a su estado anterior. La capacidad de promover la conjugación bacteriana constituye una peculiaridad exclusiva de los plásmidos; existen, empero, un grupo de estos elementos, los plásmidos no conjugativos, que son incapaces de transferirse.





4. GANANCIA Y PERDIDA DE PLASMIDOS. Son éstos moléculas de ADN capaces de autotransferirse entre bacterias. La información que encierran se suma así a la que contiene el cromosoma bacteriano hospedante (*arriba*). Una bacteria puede perder un plásmido espontáneamente o por el uso de agentes químicos como intercalantes o agentes físicos como el calor (*abajo*), regresando a su estado original.

En 1959 se encontró el segundo gran grupo de plásmidos, los plásmidos *R*, que determinan resistencia a antibióticos. Identificados en Japón durante una epidemia de disentería, en la que se aislaban de los enfermos cepas con múltiples resistencias, entre ellas a antibióticos que no habían sido usados para el tratamiento. Este fenómeno les hizo pensar que tales resistencias se habían coseleccionado junto con las adquiridas contra los antibióticos administrados a los enfermos; la explicación de tal coselección había que buscarla en que todos se codificaran por la misma molécula de ADN. Posteriormente, se determinó que todas las resistencias se transferían juntas en cepas de *Shigella disenteriae*; de ésta pasaban a otro tipo de bacterias, como *Escherichia coli*.

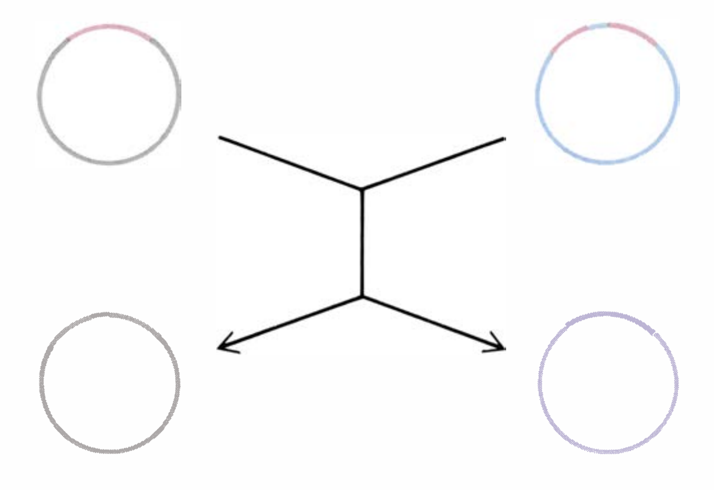
Con los años fueron descubriéndose muchos tipos de plásmidos. Presentan, además de su capacidad de transferencia y resistencia a antibióticos, múltiples virtualidades: codifican la producción de bacteriocinas, determinan la patogenecidad de las bacterias (así, en ciertos serotipos patógenos de *E. coli* o en *Agrobacterium tumefaciens*, que produce tumores en un gran número de plantas), etcétera. En ciertos medios, contener un plásmido representa una ventaja selectiva para la bacteria; por ejemplo, cuando tiene un plásmido *R* y está en presencia de un antibiótico contra el que le confiere resistencia.

En la célula bacteriana pueden coexistir varios plásmidos siempre que no tengan un mecanismo de replicación igual que les induzca a la mutua competencia. Este fenómeno de incompatibilidad constituye uno de los criterios utilizados para la clasificación de plásmidos. Son éstos moléculas muy plásticas. Atraviesan reorganizaciones estructurales que crean configuraciones con características nuevas. Participan frecuentemente en procesos de recombinación.

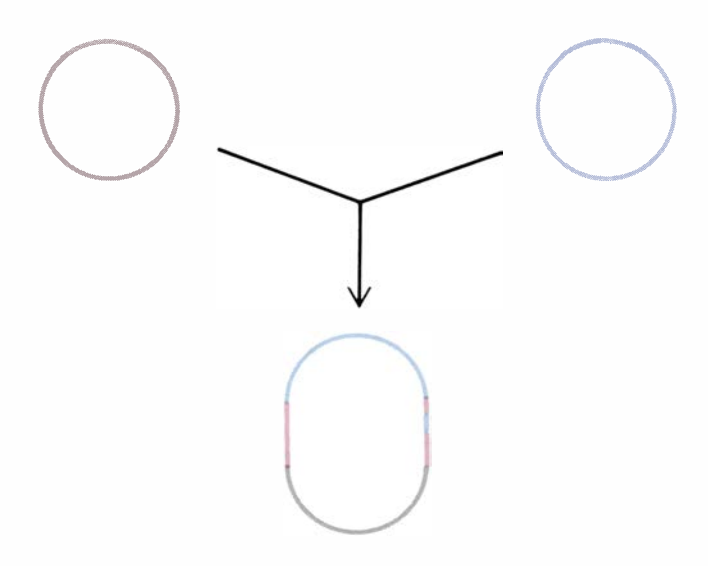
Existen dos grandes mecanismos de recombinación de ADN. Exige el primero que las secuencias a intercambiar presenten una estrecha homología (recombinación legítima); el segundo mecanismo sucede en ausencia de homología (recombinación ilegítima). La recombinación legítima puede seguir varios caminos, pero todos dependen de la función del producto de un gen denominado *recA*; del que no necesita la ilegítima para desarrollarse. Aunque no se conoce bien el mecanismo por el que se lleva a cabo esta función, se sabe que el producto del gen *recA* participa en todos los procesos celulares donde in-

RECOMBINACION LEGITIMA ENTRE PLASMIDOS

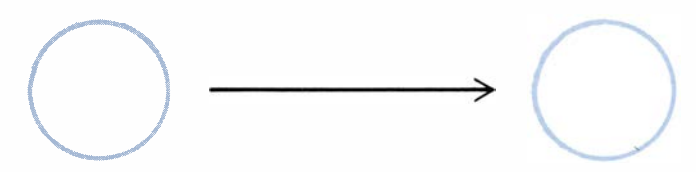
a) INTERCAMBIO DE SECUENCIAS



b) FORMACION DE COINTEGRADOS



c) RECOMBINACION INTRAPLASMIDOS



5. RECOMBINACION LEGITIMA ENTRE PLASMIDOS. Si se encuentran dentro de una bacteria secuencias de ADN homólogas, participan en procesos de recombinación. En algunos casos, los plásmidos que coexisten en una célula comparten secuencias; ello les permite intercambiar información o formar cointegrados. Las secuencias homólogas del mismo plásmido pueden perderse por recombinación.

terviene la recombinación legítima; en su ausencia, es muy bajo el rendimiento de la recombinación entre secuencias homólogas presentes en el cromosoma bacteriano.

Cuando coexisten en una célula dos plásmidos de secuencia homóloga se recombinan e intercambian información o bien se cointegran para formar una sola molécula, que es la suma de ambos plásmidos. La recombinación entre secuencias homólogas se produce a veces también dentro de la misma molécula. Propio de algunos plásmidos es que pueden participar en fenómenos de recombinación legítima en ausencia del producto del gen *recA*.

La recombinación ilegítima o transposición es la que presentan las llamadas secuencias de inserción o los transposones. Durante la transposición, las secuencias de ADN cambian de lugar en el genoma y se insertan en una región que no guarda homología con ella; si esta integración sucede dentro de un gen se produce una mutación, pues se rompe la continuidad de la información codificada. Todos los transposones y

TRANSPOSICION

a) A UNA MOLECULA CON REPLICACION AUTONOMA

b) A OTRA REGION DE LA MISMA MOLECULA

REARREGLOS PROMOVIDOS POR SECUENCIAS TRANSPONIBLES

a) DELECION

b) INVERSION

c) FORMACION DE COINTEGRADOS

6. REARREGLOS PROMOVIDOS POR TRANSPOSICION. Llamados también reordenaciones cromosómicas. Durante la transposición, una secuencia de ADN cambia de posición en el genoma y se inserta en una secuencia con la que no tiene homología. La presencia de transposones aumenta la frecuencia de rearreglos estructurales (deleciones, inversiones o formación de cointegrados) del ADN donde se halla.

las secuencias de inserción están flanqueados por secuencias invertidas repetidas; en algunos casos se sabe que determinan los productos que intervienen en su transposición.

Las secuencias que son capaces de transponer promueven reordenaciones estructurales de las moléculas en las que están insertas; a saber: deleciones, inversiones y uniones. Por cuya razón las moléculas de ADN que contienen secuencias de inserción o transposones son menos estables que las que carecen de este tipo de secuencias. Los plásmidos son moléculas de ADN donde suelen darse secuencias transponibles; de hecho, la gran mayoría de transposones descritos forman parte estructural de algún plásmido, razón de más para la plasticidad de este tipo de moléculas.

En varias especies de *Rhizobium*, parte de la información que determina el establecimiento de la simbiosis con la leguminosa está codificada en plásmidos, lo que comporta diversas implicaciones para su estabilidad, distribución entre diferentes bacterias y su capacidad de asociarse con otro tipo de información. Se han encontrado reordenaciones estructurales donde intervienen los plásmidos *Sym* de *Rhizobium*, pero no se ha determinado si son producto de recombinación legítima o no; tampoco se sabe si estas moléculas encierran secuencias transponibles.

El grupo de B. Rolfe, de la Universidad Nacional de Australia, expuso que un plásmido *Sym* de *R. leguminosarum* sufría deleciones al encontrarse dentro de una cepa de *R. trifolii*. Tales reordenaciones ocurrían con más frecuencia cuando la bacteria estaba en contacto con la planta hospedadora que cuando crecía en un medio de cultivo. El grupo de Rafael Palacios, del Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno de la Universidad Nacional Autónoma de México, encontró que al someter una cepa de *R. phaseoli* a un tratamiento para eliminar plásmidos era muy frecuente encontrar un cointegrado entre el plásmido *Sym* y otro de menos peso molecular. Por mi parte, trabajando en el mismo Centro de Investigación, hallé que el plásmido *Sym* de una cepa de *R. phaseoli* que pierde la capacidad de nodular fríjol a muy alta frecuencia presenta rearreglos estructurales y que la bacteria que contiene el plásmido rearreglado pierde la capacidad de nodular fríjol.

La participación de los plásmidos *Sym* en procesos de recombinación en condiciones naturales nos lo sugiere el hecho de que existan dos de estas moléculas que establecen la simbiosis con una especie de leguminosa, sin dejar de portar su información peculiar y distinta. Me refiero a los plásmidos *Sym* de dos cepas de *R. leguminosarum*, estudiados por J. Beringer, A. Johnston y N. Brewin, en el Instituto Johns Innes. Uno de ellos es transferible y determina la producción de bacteriocinas; el otro, que no es conjugativo, contiene los genes de la hidrogenasa de captura.

Si la información para la simbiosis puede estar asociada con información para otros procesos, cabe que, por recombinación, este tipo de secuencias estén repartidas en dos o más plásmidos independientes. Tal sucede en una cepa de *R. phaseoli*. En el Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno de la Universidad Nacional Autónoma de México, J. Leemans y M.

Mejías aislaron derivados de esta cepa que tienen defectos en el establecimiento de la simbiosis con el fríjol por la pérdida de un plásmido y que conservan otro que determina los genes estructurales de la nitrogenasa.

La información para el establecimiento de la simbiosis entre *Rhizobium* y la leguminosa está codificada, por lo menos en parte, en plásmidos. Estos plásmidos *Sym*, en condiciones de laboratorio, son moléculas muy plásticas. Ahora bien, aunque existen fenómenos en la naturaleza en los que podría tener importancia la codificación en plásmidos de la información simbiótica de *Rhizobium*, esto no se ha explorado directamente.

Entre estos fenómenos citemos la ineficacia de algunas prácticas de inoculación de leguminosas de interés comercial. A pesar de que se utilizan bacterias que en condiciones de invernadero son muy buenos simbiontes, en ocasiones se observa que en el campo este *Rhizobium* forma una fracción pequeña de los nódulos o pierde su capacidad para fijar nitrógeno con el paso del tiempo. Este problema puede deberse a que el plásmido *Sym* de la bacteria usada como inoculante sea inestable en las condiciones de campo, a que no se transfiera a otras bacterias presentes en el suelo o a que en estas condiciones participe en sucesos de recombinación que generen plásmidos con defectos en la información simbiótica.

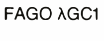
El número de los *Rhizobia* específicos para una leguminosa aumenta cuando ésta se cultiva. La información simbiótica se podría transferir por conjugación entre bacterias, de tal manera que la multiplicación de los simbiontes no sólo dependería de la capacidad de las bacterias para replicarse cuando se encuentra presente la planta hospedante, sino que se reclutarían nuevos *Rhizobia* entre las bacterias nativas del suelo que heredarán el plásmido *Sym*.

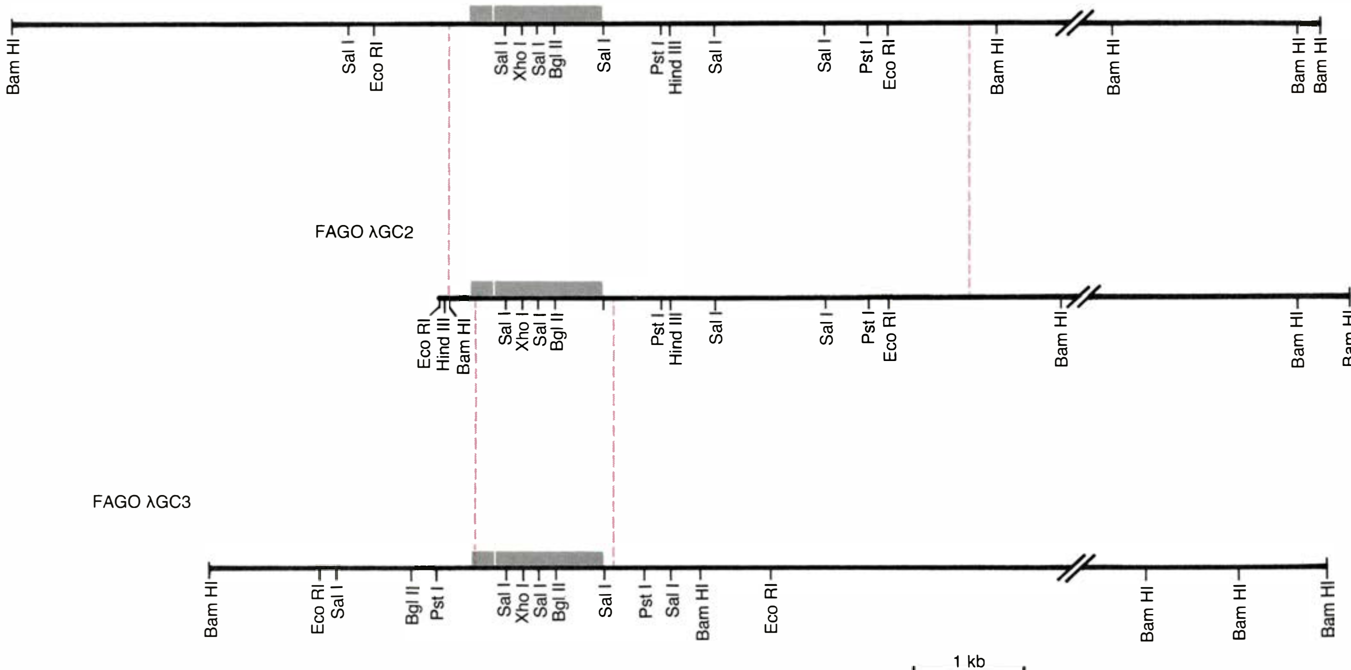
Otro fenómeno es el de la aparente dispersión evolutiva de los *Rhizobia* pertenecientes a una especie, como es el caso de *R. phaseoli*. Esta observación podría deberse a que el plásmido *Sym* de esa especie pueda funcionar en fondos genéticos muy variados, de suerte que bacterias alejadas evolutivamente permitan la expresión del plásmido y puedan formar nódulos en fríjol.

Actualmente se puede estudiar directamente la participación de los plásmidos *Sym* en los acontecimientos mencionados, ya que se cuentan con marcadores genéticos tanto en el cromosoma bacteriano como en diversos sitios del plásmido *Sym*. Por otra parte se puede hacer un análisis evolutivo de distintos plásmidos *Sym* para determinar la participación de eventos de recombinación en su generación o mantenimiento; este enfoque experimental lo está abordando el grupo de investigación de Rafael Palacios en la Universidad Nacional Autónoma de México.

La información genética de *Rhizobium* que determina el establecimiento de la simbiosis con las leguminosas está codificada en plásmidos de alto peso molecular; por ello presenta características peculiares para su distribución y mantenimiento; se puede transferir entre bacterias por conjugación y puede segregar del cromosoma bacteriano y participar en eventos de recombinación que afecten su estructura. Estas características propias de los elementos extracromosómicos repercuten en el manejo de *Rhizobium* como inoculante en plantas de interés comercial.

Al contemplar en *Rhizobium* la interacción entre dos genomas con propiedades diferentes cabe plantear enfoques experimentales que descifren la dinámica de población de estas bacterias en el suelo y permitan la selección de cepas idóneas para su empleo como inoculantes. Por otra parte, se puede aplicar a *Rhizobium* las técnicas de manipulación genética de bacterias, tales como la recombinación *in vitro* de ADN, al objeto de construir plásmidos *Sym* híbridos y seleccionar el mínimo de información que le permitiera a una bacteria del suelo fijar nitrógeno en asociación con una leguminosa sin ser desplazada por los *Rhizobia* presentes en la tierra.





7. MAPA DE RESTRICCION de las tres regiones del plásmido *Sym* de la cepa CFN42 de *R. phaseoli* que contienen los genes estructurales de la nitrogenasa. Se presentan los mapas de los insertos en los fagos λGC1 (a), λGC2 (b) y λGC3 (c). Las barras corresponden a las zonas secuenciadas en las que se resalta (*en gris*) la zona que determina la nitrogenasa reductasa (*nif H*); la homología estructural entre las regiones se muestra entre líneas punteadas. *E* corresponde a Eco RI, *H*, a Hind III; *G*, a Bgl II; *X*, a Xho I; *B*, a Bam HI; *P*, a Pst I; *S*, a Sal I. (Mapa proporcionado por Carmen Quinto, de la UNAM.)

Así cambia *Trypanosoma* su cubierta

El parásito, que priva de carne y leche a gran parte de Africa, sobrevive en el torrente sanguíneo evadiendo el sistema inmunitario. El truco que utiliza consiste en activar genes que codifican antígenos de superficie distintos

John E. Donelson y Mervyn J. Turner

El tripanosoma africano es un animal microscópico, un protozoo, que pasa parte de su ciclo biológico como parásito en la sangre de los seres humanos y de otros mamíferos. Les produce una enfermedad neurológica fatal, la tripanosomiasis, cuyo estadio final en las personas es la enfermedad del sueño. La enfermedad es endémica en una vasta región de Africa, definida por el ámbito de la mosca tsé-tsé, el hospedador intermediario que transporta el tripanosoma de un hospedador mamífero a otro. Unos 50 millones de personas corren el riesgo de contraer la enfermedad. Cada año se contabilizan unos 20.000 casos nuevos, además de los otros muchos miles de casos de los que, sin duda, no se recibe información. Aún más importante que el reto directo a los seres humanos es el hecho de que los animales domésticos sean susceptibles a la tripanosomiasis. Entre el tripanosoma y la mosca tsé-tsé hacen inhabitables para la mayoría de las crías del ganado dedicado a la producción de leche y carne unos diez millones de kilómetros cuadrados de Africa, una superficie mayor que la de los Estados Unidos de América. Al tener escaso o nulo acceso a la carne y a los productos lácteos, la mayor parte de la población está mal nutrida y es proclive a contraer otras enfermedades.

La clave del éxito del tripanosoma es su capacidad de evadir el sistema inmunitario de los mamíferos. De ordinario, un mamífero se defiende contra el ataque de virus, bacterias y protozoos, como los tripanosomas, fabricando anticuerpos específicos dirigidos contra los antígenos, o "moléculas no propias", que reconoce sobre la superficie del organismo foráneo. Los anticuerpos se unen a los antígenos y así neutralizan o matan al organismo invasor. Algunas células productoras de anticuerpos persisten en el torrente sanguíneo y proporcionan una inmunidad duradera, inmunidad que puede estimularse utilizando una vacuna que mimetice o simule una infección natural.

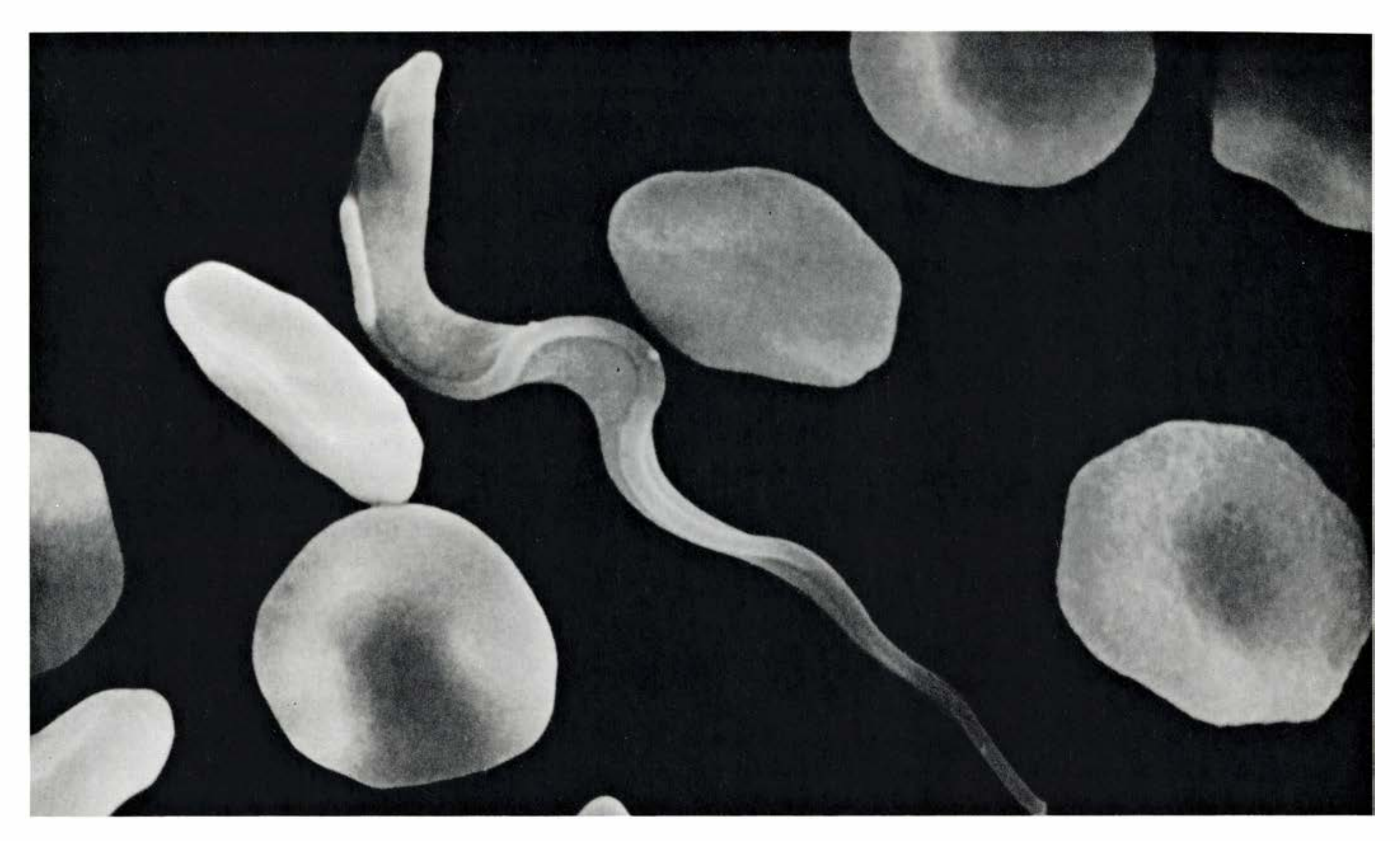
Ni la respuesta inmunitaria a la infección, ni la vacuna protegen contra la infección tripanosómica. A pesar de que estos parásitos, en el torrente circulatorio, están continuamente expuestos al sistema inmunitario del mamífero (a diferencia de lo que ocurre con el parásito de la malaria, que pasa la mayor parte de su ciclo biológico secuestrado dentro de las células), han desarrollado, por evolución, un procedimiento para evadir las defensas del hospedador: se protegen cambiando el antígeno que constituye su cubierta superficial. Para cuando el sistema inmunitario ha fabricado nuevos anticuerpos que se fijen a los nuevos antígenos, algunos de los tripanosomas ya se han desprendido de su cubierta y la han remplazado por otra antigénicamente distinta. El sistema inmunitario del hospedador, al que se le exige un trabajo superior a sus posibilidades, no logra dominar la infección y proliferan los parásitos.

La base molecular de esta notable variación antigénica se está estudiando intensamente en un buen número de laboratorios de Africa, Europa y Estados Unidos. Lo que ya se ha podido averiguar sugiere que posiblemente no haya forma alguna de ayudar al sistema inmunitario para que actúe sobre los tripanosomas cuando los parásitos ya se han establecido en el torrente sanguíneo del mamífero, pero que puede haber otras vías para abordar la prevención o el tratamiento de la enfermedad.

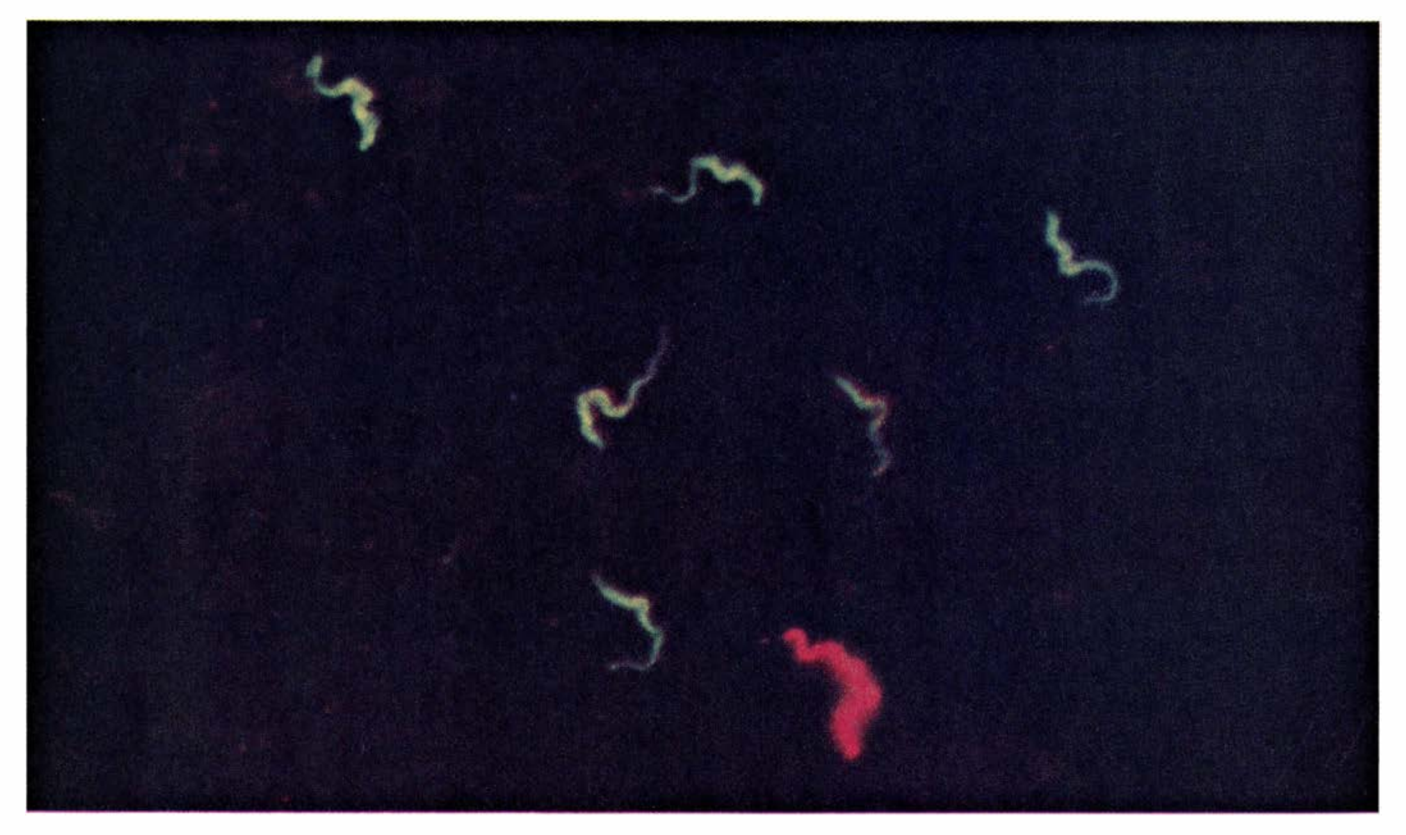
Los parásitos que han desarrollado esta eficacísima estrategia defensiva son protozoos unicelulares cuya longitud oscila entre las 15 y las 30 milésimas de milímetro. Se reconocen numerosas especies, que se han clasificado basándose en su morfología y en el tipo de hospedadores a los que infectan. Las dos principales especies que atacan a los seres humanos son *Trypanosoma rhodesiense* y *T. gambiense* (denominados así de acuerdo con los territorios coloniales donde se las identificó). Tres especies tienen importancia por su infección del ganado: *T. congolense, T. vivax* y *T. brucei*. Dada la facilidad con que se la cultiva en animales de laboratorio, y porque no sobrevive en la sangre humana, *T. brucei* es la especie preferida en los estudios de laboratorio.

Los tripanosomas, como otros muchos parásitos, toman formas diferentes a lo largo de los distintos estadios de su complejo ciclo biológico. Los tripanosomas ingeridos por una mosca tsé-tsé, protegidos por la sangre del mamífero infectado, se desplazan hasta el intestino medio de la mosca, en donde empiezan a sufrir una serie de cambios químicos y estructurales; en este proceso pierden su cubierta superficial. Al cabo de unas tres semanas aparecen en las glándulas salivales de la mosca en su forma metacíclica, que, de nuevo, lleva cubierta superficial.

Cuando la mosca pica a un mamífero, los tripanosomas metacíclicos entran en el torrente sanguíneo del hospedador, en el que rápidamente se diferencian a una forma capaz de proliferar. La enfermedad resultante en las personas puede ser aguda o crónica, dependiendo de cuál sea la especie infectante. En ambas formas, la enfermedad afecta en primer lugar a los vasos sanguíneos y las glándulas linfáticas,



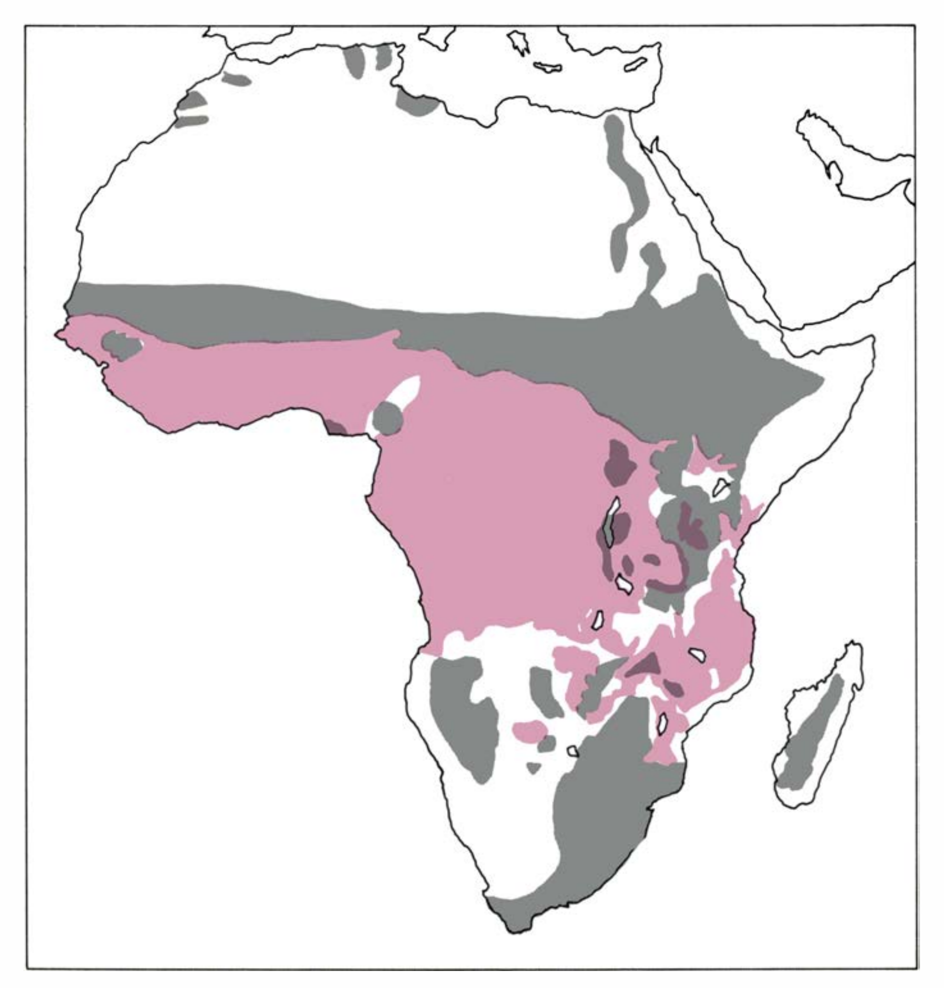
1. TRIPANOSOMA y glóbulos rojos de la sangre, aumentados 5500 veces en una micrografía electrónica de barrido tomada por Steven T. Brentano, de la Universidad de Iowa. El parásito, que se introduce en el torrente sanguíneo de un mamífero por la picadura de la mosca tsé tsé, es un animal unicelular (un protozoo) con un único flagelo que se extiende a lo largo de uno de sus lados. La supeficie del parásito está cubierta de glicoproteínas superficiales variables (VSG). Estas glicoproteínas son antigénicas, es decir, el sistema inmunitario del mamífero fabrica anticuerpos que se unen a ellas, matando al parásito. Sin embargo, los tripanosomas pueden cambiar de cubierta superficial, dando origen a una población que evade la defensa del hospedador.



2. VARIACION ANTIGENICA patentizada en esta micrografía de fluorescencia de doble exposición, realizada por Klaus M. Esser, del Instituto de Investigación Walter Reed, del ejército de los Estados Unidos. La mayoría de los tripanosomas son verdes porque el anticuerpo que reconoce y se une a su VSG de superficie se ha marcado con un colorante que emite color verde bajo radiación ultravioleta. Uno de los parásitos es rojo; ha cambiado su cubierta superficial y lleva una VSG diferente, a la que reconoce un anticuerpo distinto: en este caso el que se ha unido a un colorante que da fluorescencia roja.



3. TIENE ESTA MOSCA TSE-TSE su probóscide y su abdomen distentido de color rojo por la sangre que ingiere de un animal de experimentación. La fotografía la tomó Edgar D. Rowlon, del Instituto Walter Reed. La mosca constituye el hospedador intermediario del tripanosoma; en ella pasa el parásito por varios estadios de su desarrollo, superados los cuales se inyecta a un hospedador mamífero.



4. LA MOSCA TSE-TSE Y EL PARASITO, en conjunto, no permiten la cría de ganado en unos 10 millones de kilómetros cuadrados de tierras africanas. No existe apenas solapamiento entre el territorio ocupado por la mosca tsé-tsé (*color*) y las regiones de Africa donde se cría ganado bovino (*gris*).

causando fiebre intermitente, erupción cutánea e hinchamiento. En este estadio se inicia la persistente batalla con el sistema inmunitario del hospedador. Más tarde, los parásitos invaden el sistema nervioso central. La inflamación de las membranas externas del cerebro conduce al letargo, al coma y, finalmente, a la muerte.

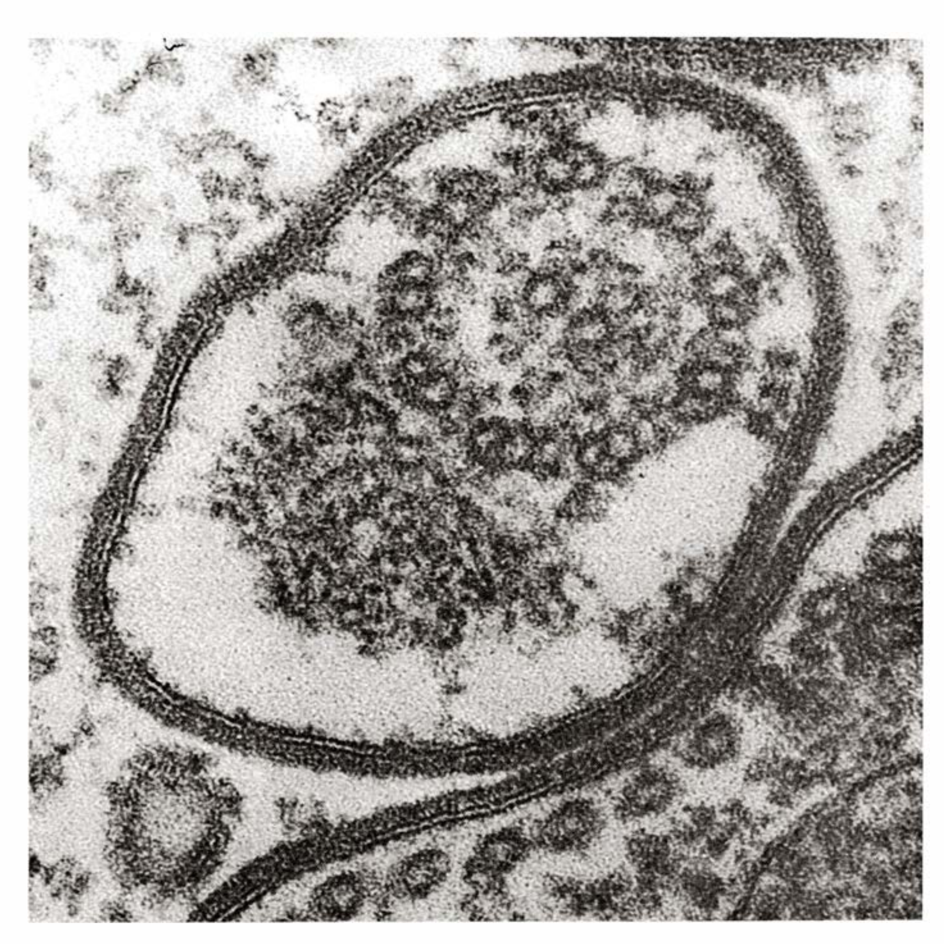
La primera indicación de que algo cambiaba continuamente durante el curso de una infección tripanosómica se obtuvo a comienzos de este siglo. Los médicos habían observado una marcada periodicidad en la temperatura de los pacientes con tripanosomiasis. En 1910, los investigadores ingleses Ronald Ross y David Thomson, al examinar muestras de sangre tomadas de un paciente cada pocos días, observaron que los cambios de temperatura corrían paralelos a una notable subida y bajada del número de parásitos presentes en la sangre. Al informar de esos hallazgos, Ross y Thomson recogieron la hipótesis propuesta un año antes por el médico italiano A. Massaglia, según la cual "las crisis tripanolíticas se deben a la formación de anticuerpos en la sangre. Algunos parásitos se libran de esa destrucción, porque se han habituado a la acción de los anticuerpos. Son los parásitos que causan la recurrencia". Se tardó 50 años en confirmar y dar explicación a tan clarividente intuición.

La explicación empezó a perfilarse en 1965, cuando Keith Vickerman, de la Universidad de Glasgow, describió la gruesa cubierta superficial que recubría la membrana celular del parásito. Enseguida se descubrió que los distintos clones de tripanosomas, poblaciones descendientes de una sola célula progenitora, poseían cubiertas superficiales diferentes. En 1968, Richard W. F. Le Page, del Instituto Molteno del Consejo de Investigación Médica de Cambridge, Inglaterra, analizó las proteínas antigénicas de la superficie aisladas de numerosos clones. Encontró que cada clon presentaba una proteína bioquímicamente distinta; las diferencias eran tan notables que sugerían que cada antígeno debía representar la expresión de un gen diferente. (Una célula expresa un gen cuando el ADN del gen se transcribe en una cadena de ARN mensajero que, posteriormente, se traduce a una proteína.)

A mediados de la década de 1970, George A. M. Cross y sus colegas, del Instituto Molteno, desarrollaron cuatro clones diferentes a partir de una población de tripanosomas que infectaba un

animal de laboratorio. Mostraron que la cubierta superficial constaba de una matriz de moléculas idénticas de glicoproteína (proteína a la que se unen grupos de carbohidratos) y que todos los individuos de un mismo clon presentaban las mismas glicoproteínas. Después de determinar las secuencias de aminoácidos (las subunidades de las cadenas de proteínas) del inicio de las glicoproteínas de sus cuatro clones, observaron que tal secuencia difería en todos los casos. La observación apoyaba la propuesta de Le Page de que los diferentes antígenos debían estar codificados por genes distintos. A estos antígenos se les denomina ahora glicoproteínas variables de superficie, o VSG (por *variable surface glycoproteins*).

En los primeros estadios de una infección, el sistema inmunitario genera anticuerpos moldeados para unirse a las VSG que "ve" sobre la cubierta superficial de los parásitos invasores. Los anticuerpos matan quizás al 99 por ciento de la población original del parásito. Sin embargo, unos cuantos tripanosomas se evaden, porque han comenzado a expresar un gen VSG diferente, y están protegidos por una nueva cubierta de VSG, a la que los anticuerpos disponibles no pueden unirse. Estos organismos variantes dan origen a una nueva población, que expresa el nuevo conjunto de VSG; la nueva población se multiplica mientras el sistema inmunitario produce otro conjunto de anticuerpos que, en su momento, lograrán de nuevo matar al 99 por ciento de los parásitos. Para entonces, sin embargo, unos cuantos parásitos habrán cambiado de nuevo su cubierta y, por tanto, proliferará una nueva población; el proceso va repitiéndose hasta que el hospedador muere. Las pruebas disponibles sugieren que el paso de una a otra VSG se produce de forma espontánea. El sistema inmunitario del hospedador no induce la producción de ninguna VSG, sino que selecciona (por su incapacidad para enfrentarse rápidamente a un determinado antígeno nuevo) una variante que inicia una nueva población.



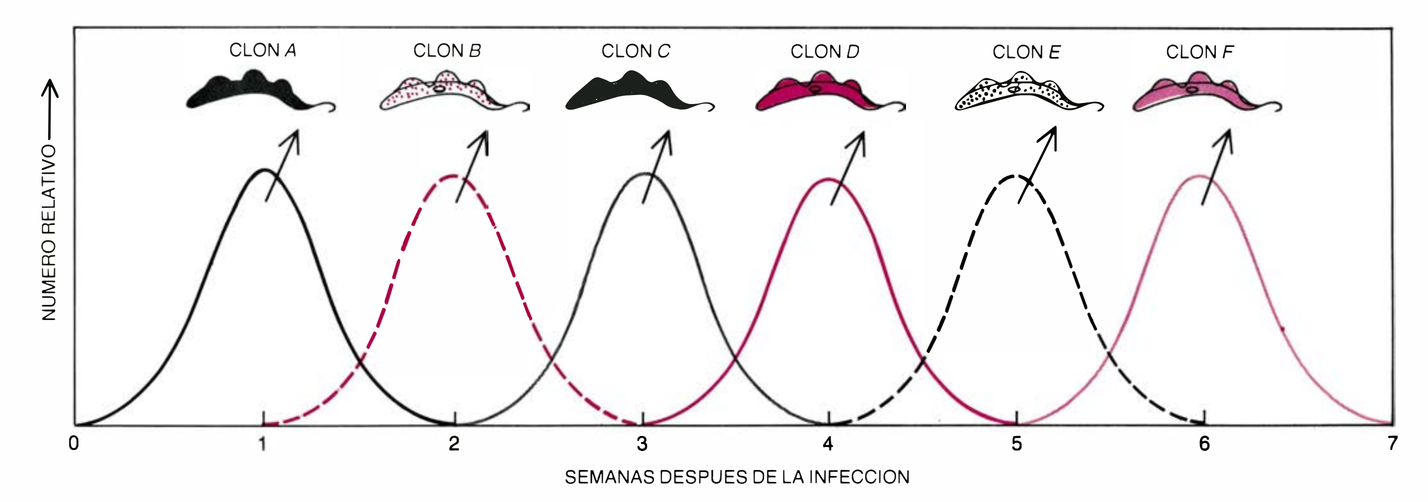
5. CUBIERTA SUPERFICIAL DEL TRIPANOSOMA, formada por VSG. Aparece como una capa oscura, difusa, en una micrografía electrónica de Laurence Tetley y Keith Vickerman, de la Universidad de Glasgow. Esta sección transversal del cuerpo del parásito y del flagelo está ampliada unas 190.000 veces. La doble membrana que se ve justo dentro de la cubierta superficial es la membrana celular.

Se desconoce el repertorio potencial total de VSG de un tripanosoma. En experimentos controlados se ha constatado que los tripanosomas procedentes de una sola célula progenitora generaban más de 100 VSG distintas, sin dar muestras de haber agotado su dotación de genes VSG. Recientemente se ha calculado que un solo organismo posee al menos unos cuantos cientos, o tal vez un millar, de genes VSG. (Lo cual significa que entre el cinco y el 10 por ciento de la capacidad genética total del parásito está dedicada a la variación antigénica.) Probablemente, en la naturaleza, el conjunto de genes de todos los tripanosomas proporcione información genética para generar un número virtualmente infinito de VSG antigénicamente distintas.

¿Cuál es la estructura de la VSG y cómo se une a la membrana celular? ¿Cómo logra el parásito expresar un gen VSG cada vez (y solamente uno) de los cientos de ellos que componen su repertorio? Con el fin de averiguar algo acerca de las VSG y de su sucesiva expresión por parte del tripanosoma, numerosos grupos investigadores están utilizando con éxito procedimientos que explotan técnicas de ADN recombinante.

El primer paso consiste en aislar el ARN mensajero (ARNm) de un clon de tripanosomas. Se prepara una copia del ARNm, obteniéndose lo que se ha dado en llamar ADN complementario (ADNc), que luego se combina con un ADN portador (*carrier*) y se introduce en una población de bacterias. Mediante manipulaciones en las bacterias que albergan el ADN recombinante, se aísla una molécula de ADNc que sea copia del gen VSG que expresa el clon de tripanosomas. Tras determinar la secuencia de nucleótidos del ADNc y traducirla de acuerdo con la clave genética, cabe predecir la secuencia de aminoácidos de la VSG que codifica el gen.

Conocemos ya las secuencias parciales o totales de unos 15 ADNc; el análisis de las secuencias de aminoácidos deducidas revela que cada VSG recién sintetizada está formada por unos 500 aminoácidos. Los 20 o 30 primeros constituyen un péptido señal (una cadena corta de proteína) cuya función es ayudar a la VSG naciente para que se desplace a través de la membrana celular del tripanosoma. Al comparar la secuencia de aminoácidos dictada por el ADNc con la secuencia que de hecho existe en unas cuantas VSG, se ha visto que el péptido señal se corta y se separa durante el proceso. La secuencia de los 360 aminoácidos que siguen a continuación difiere bastante entre la mayoría de las VSG, y se presume que tal región



6. OLEADAS SUCESIVAS de proliferación del parásito en la sangre, características de la tripanosomiasis. Son consecuencia de la variación antigénica. Una población de parásitos, algunos de los cuales llevan un antígeno determinado, VSG *A*, sobre su superficie, proliferan durante unos cuantos días en el torrente sanguíneo. El sistema inmunitario produce anticuerpos contra los antígenos de la población, matando la mayoría de los parásitos. Unos cuantos parásitos sobreviven y expresan nuevos genes, VSG *B*. Estos parásitos dan origen a una nueva población que produce anticuerpos contra los nuevos antígenos. El ciclo se repite continuamente durante el curso de una enfermedad crónica, dado que los parásitos no cesan de expresar nuevos genes y exhibir nuevas VSG. De cada población sucesiva se pueden aislar tripanosomas individuales y, a partir de ellos, obtener clones que expresen determinadas VSG.

es la responsable de la diversidad antigénica del parásito. Los últimos 120 aminoácidos (los situados en el denominado extremo carboxílico de la proteína) son bastante semejantes en varias VSG. Y, a partir del grado de semejanza en estas regiones de homología, se han clasificado las VSG en dos grupos.

De ordinario, son las secuencias peptídicas de la región carboxílica las que anclan las proteínas en la membrana de la célula. En ello difieren las VSG. Los últimos 20 aminoácidos de la región suelen cortarse y separarse en la VSG madura, y se remplazan por una estructura que contiene un oligosacárido (una molécula compleja de azúcar), poco corriente, que interviene en la función de anclaje. Este parece ser muy similar en todas las VSG, sin que importe la secuencia de su región variable, ya que los anticuerpos producidos frente a un oligosacárido se unen a todas las moléculas de VSG. ¿Por qué este determinante de reacciones cruzadas, tal como se le denomina, no induce inmunidad natural y por qué no sirve para vacuna? La razón es, en líneas generales, la siguiente: las VSG están empaquetadas dentro de la cubierta superficial de manera tal que el sistema inmunitario sólo hace frente al dominio variable de la proteína; el dominio de homología, incluido el determinante de reacciones cruzadas, no queda expuesto.

El determinante de reacciones cruzadas parece formar parte de una molécula de oligosacárido de mayor tamaño que, a su vez, está unido a un fosfoglicérido que lleva dos cadenas de ácido graso. Estos ácidos grasos son los que penetran en la membrana de la célula y mantienen la VSG en su lugar adecuado. ¿Por qué el tripanosoma habría de sustituir por esta complicada estructura el anclaje carboxílico a la membrana? La razón quizá sea que la capacidad de eliminar rápidamente su cubierta superficial es de capital importancia para el parásito. El tripanosoma posee una enzima que rompe el enlace entre ácidos grasos, eliminando así la VSG de la membrana. El hecho de que todas las VSG, independientemente de su secuencia precisa, tengan la misma molécula especializada de anclaje, capaz de ser cortada por la misma enzima, constituye un mecanismo rápido y universal para eliminar la cubierta y sustituirla por otra.

Aunque el estudio comparativo de las secuencias de los ADNc ha puesto de manifiesto amplias diferencias entre las VSG, está claro que el cambio de unos pocos aminoácidos es suficiente para generar VSG antigénicamente distintas. Se piensa que esos cambios tienen lugar en ciertos sitios antigénicos de la región variable de 360 aminoácidos. Para hallarlos será necesario conocer detalladamente la estructura tridimensional de la región variable. Recientemente se ha avanzado en ese sentido gracias a los estudios cristalográficos realizados por Don C. Wiley, Douglas M. Freymann y Peter Metcalf, de la Universidad de Harvard, en colaboración con uno de nosotros (Turner), en el Instituto Molteno.

Hasta la fecha se han cristalizado cinco VSG, pero los mayores avances se han registrado en el establecimiento de la estructura del dominio variable preparado a partir de una de ellas. La resolución lograda hasta el momento es suficiente para mostrar las partes de una cadena de proteína, plegadas de acuerdo con la conformación cilíndrica conocida por hélice alfa. Parece que la mitad de la región variable tiene esa forma.

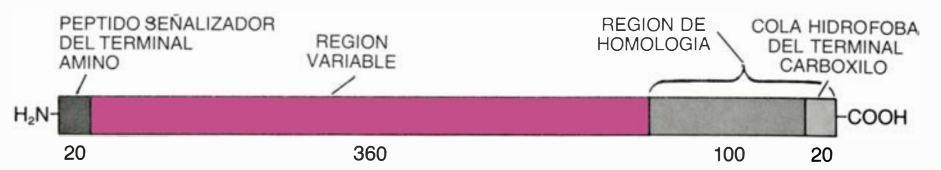
La región variable cristaliza como un dímero (una molécula doble, formada por dos monómeros) y, efectivamente, también las VSG parecen estar agregadas como dímeros en la cubierta superficial de los tripanosomas vivos. La cristalografía indica que el dímero (o, al menos, la mitad resuelta del mismo) es un haz de hélices alfa. La parte central, el núcleo del haz, lo forman dos estructuras en alfiler, cada una de ellas procedente de uno de los monómeros componentes. En uno de los extremos del dímero, el núcleo interactúa con otras dos hélices más para constituir un haz de seis hélices. En el otro extremo, los monómeros divergen ligeramente, conformando una cabeza característica. Esta estructura, sumamente simétrica, debe constituir el marco para la restante mitad de la secuencia del dominio variable, todavía no conocida porque no es una hélice alfa. Aún no sabemos cómo se orienta en la membrana esa estructura marco (es decir, cuál de los dos extremos es el que va hacia fuera) y, por ello, todavía no podemos conjeturar en qué lugar de la estructura se encontrarán los principales sitios antigénicos.

¿Qué mecanismo actúa cuando el tripanosoma engarza un gen VSG tras otro, sintetizando siempre una sola gli-

coproteína de superficie, antigénicamente distinta? Los experimentos diseñados para responder a la cuestión se apoyan, nuevamente, en los ADNc de la clase descrita más arriba. Esos ADNc, que de hecho son genes VSG artificiales, sirven de sonda para localizar copias de ellos en cualquier lugar del genoma del tripanosoma donde puedan encontrarse (el genoma es la dotación total de material genético).

El ADN genómico total se digiere con una enzima de restricción que corta el ADN por un punto específico de una determinada secuencia de nucleótidos. El ADN genómico queda, así, roto en gran número de pequeños fragmentos, cada uno de ellos de tamaño ligeramente diferente. Después de separarlos con arreglo a su tamaño mediante un proceso denominado electroforesis en gel, los fragmentos se transfieren a un papel de nitrocelulosa al que se unen fuertemente. A ese papel se le aplica un ADNc que representa un gen VSG, marcado con un isótopo radiactivo. El ADNc hibrida (se une) con las secuencias iguales que encuentra entre los fragmentos obtenidos con la enzima de restricción y que están sobre el papel. El ADNc que queda sin fijar se lava; al obtener una autorradiografía se ponen de manifiesto los sitios donde ha habido hibridación. Se puede determinar de este modo cuántas copias diferentes del gen representado por el ADNc empleado de sonda hay en un clon de cierto tripanosoma, y si el gen está o no en una parte diferente del genoma en clones distintos.

De esta manera, Piet Borst y sus colegas, de la Universidad de Amsterdam, y Cross y sus compañeros, de los Laboratorios Wellcome Research, de Inglaterra, demostraron que, cuando se expresan algunos genes VSG, en el genoma hay una copia extra del gen. La denominaron "copia ligada a la expresión". Etienne Pays y Maurice Steinert, de la Universidad Libre de Bruselas, lograron demostrar que el ARNm para el gen VSG expresado se transcribe a partir de esa copia, y no a partir del gen original (la copia básica) que le dio origen. Posteriores análisis pusieron de manifiesto la presencia de una copia ligada a la expresión cerca de un telómero (el extremo de un cromosoma). Dicho con otras palabras, un gen VSG cualquiera de los que constituye el repertorio total de este tipo de genes se expresa cuando se ha duplicado y traslocado a un sitio de expresión próximo a un telómero; el paso de la puesta en



7. CADENA PROTEICA de una VSG típica. La componen unos 500 aminoácidos. Los 20 primeros, aproximadamente, del extremo denominado terminal amino, constituyen un péptido de señalización, que se separa de la proteína antes de que la VSG se integre en la membrana celular. Los siguientes 360 aminoácidos (*color*) constituyen la región variable, que es distinta en todas las VSG de diferente antigenicidad. Los últimos 120, del extremo denominado terminal carboxilo, son bastante similares en los dos "grupos de homología" de VSG. Los últimos 20 aminoácidos de esa región se cortan y se separan de la cadena; se sustituyen por un oligosacárido (un azúcar), que ancla la VSG a la membrana celular.

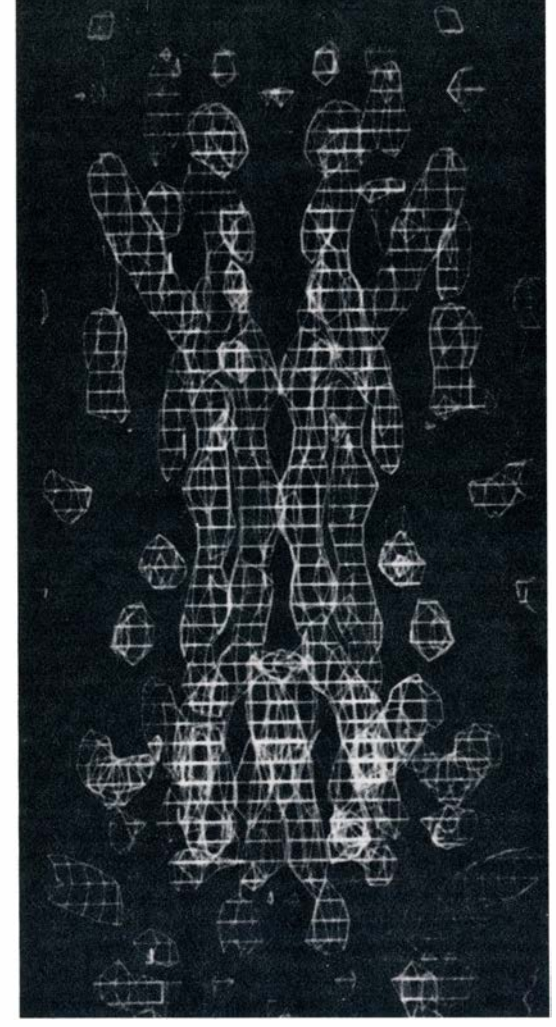
8. VSG DE LA CUBIERTA SUPERFICIAL. Podrían estar ensambladas tal como indica este dibujo, un tanto idealizado. La estructura de parte de la región variable de una VSG (*color*) se apoya en datos cristalográficos obtenidos con rayos X (*véase la figura 9*). La extensión total de la VSG y la localización de sus vecinas se indica en forma de cilindros grises. La región variable es un dímero o molécula doble, que parece ser un haz, o manojo, de estructuras de proteína denominadas hélices alfa. Este haz está flanqueado por moléculas de carbohidrato. Otros dos carbohidratos, situados en la base de la VSG, pueden incorporar una pequeña molécula de azúcar: el determinante de las reacciones cruzadas. Los ácidos grasos que se prolongan desde éstos parecen anclar la VSG a la membrana. (Dibujo de Ilil Arbel.)

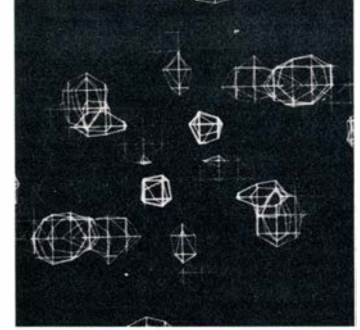
funcionamiento de un VSG a otro se efectúa con frecuencia mediante la eliminación y degradación de una de esas copias y su sustitución por la copia de otro gen.

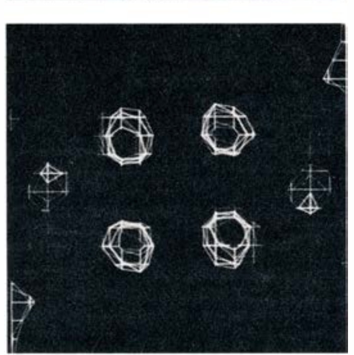
Tal mecanismo de copia y traslocación no es la única fuente de variación antigénica. John R. Young, Phelix A. O. Majiwa y Richard O. Williams, del Laboratorio Internacional para Investigaciones sobre Enfermedades de los Animales, de Nairobi, han encontrado otro. Descubrieron que, en algunos casos, el número de fragmentos diferentes con los cuales hibrida un determinado ADNc sonda no cambia cuando se expresa el gen VSG representado por la sonda: no hay entonces copia ligada a la expresión. La sonda hibrida, por el contrario, con un fragmento diferente en cada clon de tripanosomas, tanto si el clon está expresando el gen como si no lo hace.

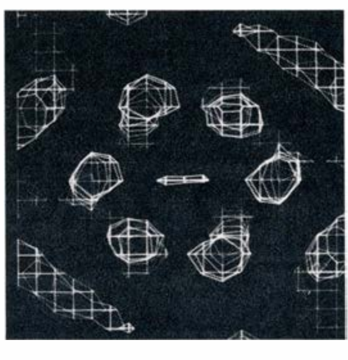
Quiere ello decir que algunos genes VSG se expresan sin haberse duplicado ni traslocado. Y resulta que esos genes ya están cerca del telómero. Su proximidad a un telómero explica por qué sus fragmentos varían de tamaño. En los tripanosomas y en algunos otros organismos es frecuente el caso de que una secuencia corta de ADN se repita cientos de veces cerca de un telómero. El número de estas "repeticiones tándem" localizadas entre un gen VSG y un telómero varía de un clon a otro, de ahí que el fragmento que transporta un determinado gen VSG ligado al telómero pueda diferir de tamaño entre clones distintos.

Aproximadamente la mitad de los genes VSG estudiados hasta la fecha parecen estar ligados al telómero. Dado que en el genoma del tripanosoma existen cientos de genes VSG diferentes, habrá al menos varios cientos de genes VSG ligados al telómero en el genoma y, por tanto, cientos de cromosomas en el núcleo del parásito. (El número de cromosomas en la especie humana es solamente de 46.) Puesto que el parásito posee una cantidad normal de ADN para un animal unicelular, era de esperar que algunos de los cromosomas del parásito fuesen muy pequeños; lo son, de hecho. Un alumno de Borst, Lex H. T. van der Ploeg, ha aplicado una técnica desarrollada por David C. Schwartz y Charles R. Cantor, de la Universidad de Columbia, para resolver el ADN nuclear del tripanosoma en cuatro clases, de acuerdo con el tamaño: minicromosomas, con una longitud equivalente a 100.000 nucleótidos; otros cromosomas pequeños, pero con una longitud entre 2 y 7 veces mayor; moléculas de magnitud mediana (con un millón de nucleótidos, aproximadamente) y otros, que resultan demasiado largos para medirlos por este procedimiento.





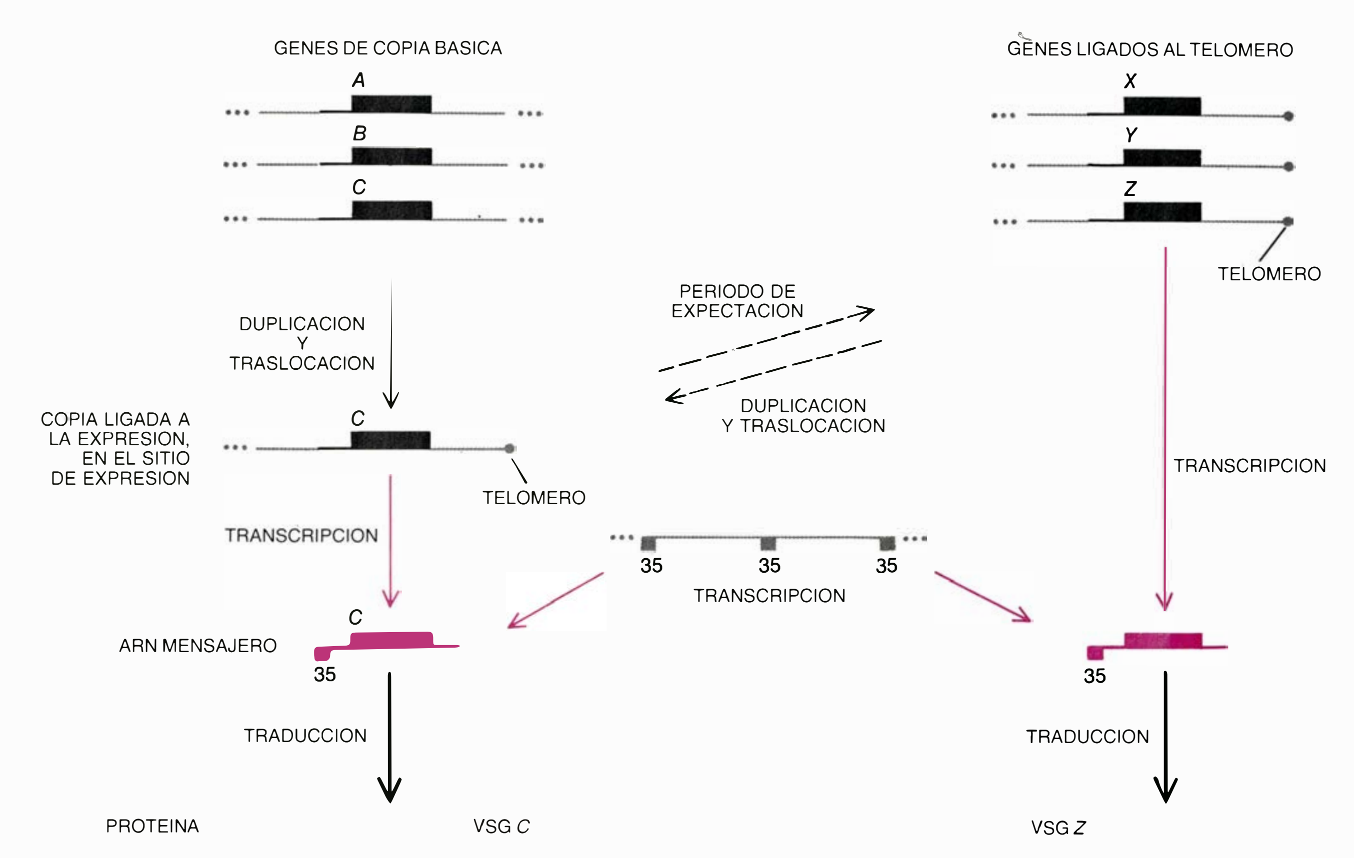




9. ESTRUCTURA de aproximadamente la mitad de la región de una VSG, según determinaron por cristalografía de rayos X Don C. Wiley, Douglas M. Freymann y Peter Metcalf, de la Universidad de Harvard, en colaboración con uno de nosotros (Turner). La región cristaliza como un dímero. Un mapa de densidad a los electrones (*izquierda*), en vista perpendicular al eje del dímero, pone de manifiesto un haz de hélices alfa en forma de varillas. Hay seis hélices en un extremo (aquí abajo, aunque no se conoce la orientación del dímero) y de cuatro a seis en el centro. Los monómeros divergen en la parte superior para formar una estructura con dos cabezas. Los mapas de cortes transversales (*derecha*) son vistas tomadas a lo largo del eje del dímero en la parte superior, en la parte central y cerca de la parte inferior.

Van der Ploeg encontró genes VSG en cromosomas de las cuatro clases. En un caso halló una copia de un gen básico sobre un cromosoma grande y su correspondiente copia ligada a la expresión sobre uno de tamaño medio, lo que indicaba que la traslocación de una molécula duplicada podía presentarse entre dos cromosomas. En otro caso, el gen ligado al telómero no estaba duplicado, pero se expresaba en su sitio normal, cerca del extremo de un cromosoma grande. Estas observaciones apoyaban las pruebas iniciales, acumuladas en varios laboratorios, de que en el genoma debe haber más de un sitio de activación de los genes VSG; no todos se traslocan hacia un mismo sitio de expresión, en las proximidades de determinado telómero. Aunque la vecindad de un telómero sea necesaria para la expresión, puede no resultar suficiente. Para que se realice su transcripción en ARNm deben entrar en juego otros factores que seleccionan y activan cada vez un solo gen VSG del organismo.

Algunos de los procesos que participan en esta activación pueden contribuir a aumentar la diversidad de VSG. Pays, Steinert y sus colegas han informado de casos de una copia funcional ligada a la expresión que no se generaba por duplicación de un gen de copia básica, sino por la "recombinación" de



10. LOS GENES DE COPIA BASICA ubicados en las porciones no extremas de los cromosomas del tripanosoma (*izquierda*) no suelen transcribirse a ARN mensajero (ARNm). Para que uno cualquiera de ellos se exprese debe duplicarse previamente, proporcionando una copia ligada a la expresión. El ADN de la copia se trasloca a un sitio de expresión próximo al telómero (el extremo del cromosoma) y se transcribe a ARNm, que se traduce a la proteína VSG. Otros genes VSG se encuentran, de por sí, cerca del telómero (*derecha*). Estos genes ligados al telómero pueden expresarse sin formar una copia ligada a la expresión, pero ocasionalmente también se duplican y se traslocan. Al producirse un cambio de actividad antigénica suele perderse una copia ligada a la expresión aunque, a veces, "queda a la expectativa" para convertirse en gen ligado al telómero, que no se expresa. Curiosamente, una secuencia de 35 nucleótidos que aparece en uno de los extremos del ARNm no está codificada por el gen VSG, sino por una región separada de ADN repetitivo.

segmentos de al menos dos genes diferentes ligados al telómero, cada uno de los cuales codifica una parte de la VSG resultante. Si ese tipo de recombinación fuera un fenómeno general, permitiría que el tripanosoma fabricara aún más VSG de las que pueden especificar sus cientos de genes VSG. Lo cual sugiere, además, una razón para la localización telomérica de los sitios de expresión: las prolongaciones de ADN altamente repetitivas, tales como las cortas repeticiones tándem próximas a los telómeros, son especialmente proclives a sufrir recombinaciones.

En ciertas ocasiones, una copia ligada a la expresión no se destruye al desencadenarse la expresión de otro gen: "queda a la expectativa", durante cierto tiempo, en un sitio de expresión. Uno de los autores (Donelson) ha mostrado recientemente, en la Universidad de Iowa, que las secuencias que limitan una determinada copia ligada a la expresión son virtualmente idénticas a las zonas que rodean a un gen ligado a un telómero. Ello, unido a hallazgos similares realizados por otros grupos, sugiere que algunos de los genes VSG ligados al telómero pudieran ser copias ligadas a la expresión, previamente expresadas y que han sobrevivido a la activación de un nuevo gen. Quizá dos cromosomas intercambien regiones adyacentes a sus telómeros de suerte tal que una copia ligada a la expresión abandone su sitio original de expresión y se coloque cerca de otro telómero diferente, donde quedará disponible para su posterior expresión. O bien, un pequeño segmento de ADN del genoma actúe de elemento móvil de control: a modo de reforzador de la transcripción que se desplaza de un telómero a otro y favorece la expresión de diferentes genes. En este caso, una copia de un gen ligado a la expresión podría permanecer en su sitio de expresión, pero quedaría desconectado al alejarse el elemento de control.

Presentan otra particularidad los tripanosomas y organismos emparentados. Los ARNm para las VSG (y para otras muchas, si no para todas las proteínas) se inician siempre con una misma secuencia específica de 35 nucleótidos. Tal secuencia no se encuentra en el gen correspondiente ni en ningún otro lugar del ADN que rodea al gen, sino que está codificada por una secuencia repetitiva de ADN apartada del gen. Pequeñas moléculas de ARN transcritas a partir de este ADN repetido proporcionan, de alguna manera, copias de la secuencia de 35 nucleótidos para el comienzo de cada uno de los ARNm. La secuencia de 35 nucleótidos interviene, presumiblemente, en la expresión de los genes del tripanosoma, pero se ignora cuál pueda ser su cometido en la misma.

Resumamos el estado actual de los mecanismos de variación antigénica del tripanosoma. En el genoma de cada organismo hay cientos de genes que codifican VSG. Pueden hallarse en el interior de los cromosomas o bien cerca de los telómeros. Sólo se transcribe un gen VSG por vez y siempre cerca de un telómero. Para que se transcriba un gen interior (copia básica) debe duplicarse y traslocarse (como copia ligada a la expresión) a uno de los muchos sitios de expresión, todos los cuales están cerca de los telómeros. Por el

contrario, un gen ligado al telómero no tiene por qué duplicarse para que se exprese (aunque a veces sí se duplica). La diversidad antigénica puede aumentar aún más por recombinación. Los mecanismos moleculares precisos que desencadenan la activación de un gen o de otro no se conocen todavía. Sin embargo, parece que tales mecanismos son tan complejos y variados que resulta casi imposible evadirlos, por lo que no parece probable que se logre desarrollar una vacuna eficaz contra los tripanosomas que circulan por el torrente sanguíneo.

Sin embargo, quizá pueda desarrollarse una vacuna contra lo tripanosomas metacíclicos. Tal como hemos dicho anteriormente, el estadio metacíclico es el del final del desarrollo, en las glándulas salivales de la mosca tsé-tsé, y son esos parásitos metacíclicos los que la mosca inyecta al torrente sanguíneo cuando pica a un mamífero. Steven L. Hajduk, J. David Barry y Vickerman, en Glasgow, y Klaus M. Esser, del Instituto Walter Reed de Investigación del Ejército de los Estados Unidos, en Washington, encontraron que los parásitos metacíclicos sólo exhiben en su superficie un pequeño subconjunto de VSG, tal vez apenas quince. En colaboración con Esser, uno de nosotros (Donelson) ha estudiado los ADNc de varias VSG metacíclicas y ha comprobado que las proteínas tienen casi la misma región de homología carboxiterminal que las VSG del torrente sanguíneo, y que aparentemente se unen a la membrana celular de la misma manera. Es más, parece que los genes para las VSG metacíclicas son de los ligados a telómeros, al igual que muchos de los genes VSG para las formas de torrente sanguíneo. Seguimos, pues, sin saber por qué los parásitos metacíclicos no pueden expresar la gama completa de VSG. Aun así, quizá se descubra alguna vía para tomar ventaja de su limitado repertorio, o bien de su mecanismo de puesta en funcionamiento, que permita preparar una vacuna efectiva.

Los fármacos hoy en uso para tratar la tripanosomiasis son extremadamente tóxicos y no evitan la reinfección, pero tal vez puedan encontrarse nuevas formas de quimioterapia. El tripanosoma no puede sobrevivir en un hospedador mamífero sin su cubierta superficial, por lo que una droga que interfiriese con el fosfoglicérido que ancla la VSG a la membrana de la célula, o que activara la enzima que libera la VSG, podría constituir un agente terapéutico efectivo. Los ARNm de los mamíferos no poseen la secuencia no habitual de 35 nucleótidos descrita más arriba y, por tanto, cualquier droga que interfiera con su síntesis podría incapacitar selectivamente al parásito. Podrían encontrarse también sustancias que actuaran sobre dos orgánulos subcelulares que parecen ser únicos de los tripanosomas.

Uno es el glicosoma, un agregado de enzimas unido a la membrana, y el otro es el cinetoplasto, un apéndice de la gran mitocondria única que tiene el parásito. Una droga capaz de interferir la función metabólica de esos orgánulos o cualquier otra ruta metabólica única y todavía no descubierta mataría el tripanosoma sin dañar al mamífero hospedador.

Quedan otras vías de abordar el problema. Cabe erradicar en poco tiempo la mosca tsé-tsé, en pequeñas extensiones, utilizando insecticidas o distribuyendo moscas macho estériles, pero esos métodos serán de dudosa eficacia en una región que cubre unos 10 millones de kilómetros cuadrados y que abarca a varios países. Algunas razas de ganado que forman rebaños pastoreados por tribus nómadas parecen haber desarrollado una resistencia parcial a la tripanosomiasis. No son grandes productores de carne ni de leche, pero podrían cruzarse con razas más productoras. Quizá pudieran domesticarse algunos animales salvajes a los que, como el órix, o antílope abisinio, no parecen afectarles los tripanosomas, de modo que llegaran a ocupar el lugar de la ganadería actual.

Los últimos años han puesto de manifiesto que los tripanosomas son soberbios organismos de experimentación. La investigación continuada sobre su variable cubierta superficial puede proporcionar información básica acerca de asuntos tan distintos como el control de la expresión génica, la forma en que están unidas y funcionan las proteínas de la membrana, la estructura y replicación de los telómeros cromosómicos y los mecanismos moleculares que generan diversidad biológica.

Los conocimientos fundamentales de esta clase deberían, a su vez, contribuir a una apremiante tarea de sanidad pública, cual es el control de las tripanosomiasis. Los próximos años nos dirán si la información básica sobre los tripanosomas puede aplicarse al control, y quién sabe si a la erradicación, de la tripanosomiasis.

Fuentes explosivas de rayos gamma

Destellos intensos de radiación de alta energía aparecen de forma imprevisible en el cielo. Aunque por los datos recogidos no podemos determinar su causa, se han avanzado ya varios mecanismos plausibles

Bradley E. Schaefer

Aproximadamente una vez al día tiene lugar una explosión muy intensa de rayos gamma en alguna parte del cielo que no se puede determinar de antemano. La explosión dura de uno a diez segundos, aunque las hubo que transcurrieron en 0,01 segundos y otras que se prolongaron 80 segundos. A lo largo de ese tiempo, la explosión aumenta de brillo hasta convertirse en visible, varía en intensidad de forma aleatoria y termina por remitir y caer en la invisibilidad. Salvo excepciones, nunca se han visto explosiones en la misma dirección en que había aparecido otra anterior, ni se han identificado con ningún objeto antes conocido.

En su momento de máxima intensidad, estas explosiones son, con mucho, las emisiones de rayos gamma más brillantes de todo el cielo. Si se usan hipótesis razonables acerca de la distancia del objeto origen de la explosión (al que se conoce en inglés con el nombre de «burster», fuente explosiva), ésta parece liberar más potencia por unidad de volumen que cualquier otro objeto del universo. Según un cálculo aproximado, la energía que producen en un segundo equivale a la liberada por el Sol en una semana.

A pesar de la enorme cantidad de energía que conlleva cada emisión, se sabe muy poco de las fuentes explosivas de rayos gamma. Por una parte, no se pueden predecir sus erupciones; por otra, aparecen en una región del espectro electromagnético muy difícil de medir con precisión. La escasez de datos observacionales deja libertad para proponer gran número de modelos. Hasta la fecha se han publicado casi 40 tipos de fuentes explosivas de rayos gamma; algunos exóticos: agujeros negros en explosión, granos de polvo ultrarrelativista y fisión de elementos superpesados. Resulta desconcertante que la mayoría de estos modelos sean compatibles con los datos observacionales.

No obstante la escasa cantidad de información disponible, los astrónomos están llegando a un consenso respecto a las características generales de una fuente explosiva de rayos gamma. Además, se están construyendo instrumentos que pueden esbozar una respuesta a muchas de las cuestiones pendientes sobre las propiedades de las explosiones. Quizá se consiga, en un futuro próximo, determinar con precisión la causa de estas erupciones de rayos gamma y dar así por terminadas las especulaciones que estos misteriosos fenómenos han suscitado desde su descubrimiento, hace más de una década.

Las fuentes explosivas de rayos gamma fueron observadas por una serie de satélites Vela, bajo el control del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Los satélites, proyectados para vigilar el cumplimiento por parte soviética de un tratado que prohibía los experimentos nucleares en el espacio, llevaban a bordo detectores para registrar el destello repentino de radiación gamma que acompaña a las explosiones nucleares. Tras detectar unos cuantos destellos, se cayó en la cuenta de que no se trataba de experimentos atómicos, sino de un nuevo tipo de objetos astronómicos, desconocidos hasta aquel momento. El descubrimiento de las fuentes explosivas de rayos gamma fue confirmado, al poco tiempo, por Thomas L. Cline y Upendra D. Desai, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, perteneciente a la NASA. Poco después, varios grupos diferentes encontraron más explosiones de rayos gamma en datos procedentes de experimentos realizados en el pasado con otros propósitos.

Mediados los años setenta, se inició una segunda generación de experimentos (véase "Erupciones de rayos gamma cósmicos" de Ian B. Strong y Ray W. Klebesadel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1976). A fin de localizar la dirección de una erupción de rayos gamma con la mayor precisión, varios investigadores establecieron una red de una docena de detectores a bordo de varias naves espaciales que iban a ser dirigidas hacia el sistema solar interno.

En uno de ellos, el llamado "experimento Konus" ("Konus" deriva de la palabra cono en ruso y alude a la configuración de la nave espacial), se equipó a cuatro sondas espaciales soviéticas Venera con detectores de muy alta sensibilidad. Los físicos E.P. Mazets, S.V. Golenetskii y sus colegas, del Instituto A.F. Joffe de Física y Tecnología de Leningrado, usaron estos detectores para recopilar un catálogo de tiempos, posiciones, espectro y variaciones de brillo de cientos de erupciones diferentes.

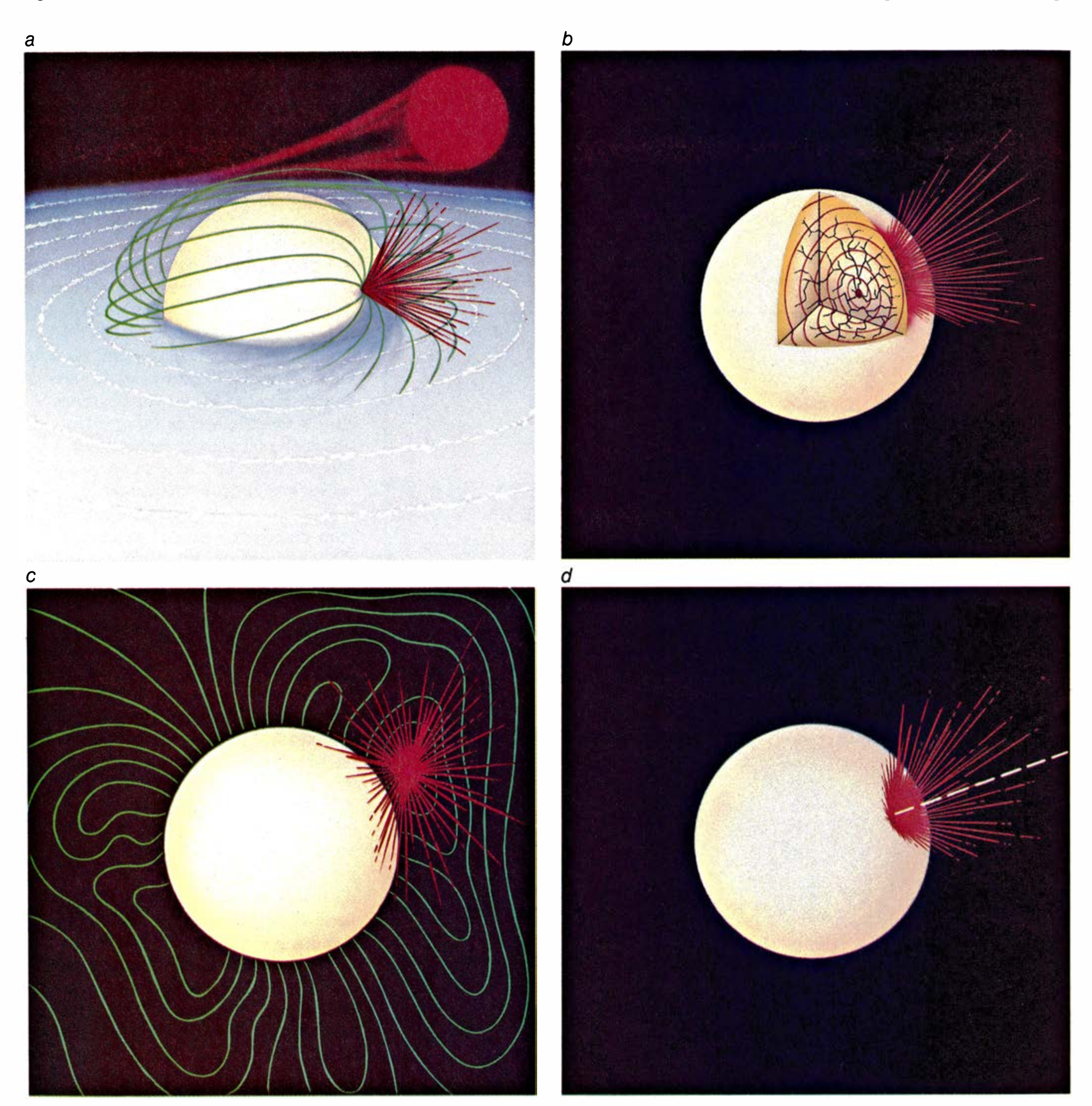
A pesar de que estas observaciones más recientes han permitido determinar la posición de algunas erupciones, resulta difícil conseguir información específica acerca de cualquiera de ellas. Duran poquísimo y el punto de su aparición es imprevisible; ello impide se les descubra por medio de un detector sensible de campo de visión estrecho. Para tener una mínima esperanza de detectar una explosión en la práctica, el observador ha de usar un detector de gran angular, relativamente insensible.

No acaban ahí las dificultades. Las explosiones consisten, casi por entero, en radiación gamma, que es absorbida por la atmósfera de la Tierra. Hay que instalar, pues, los detectores en el espacio, un proceso caro y complicado. Además, los detectores de rayos

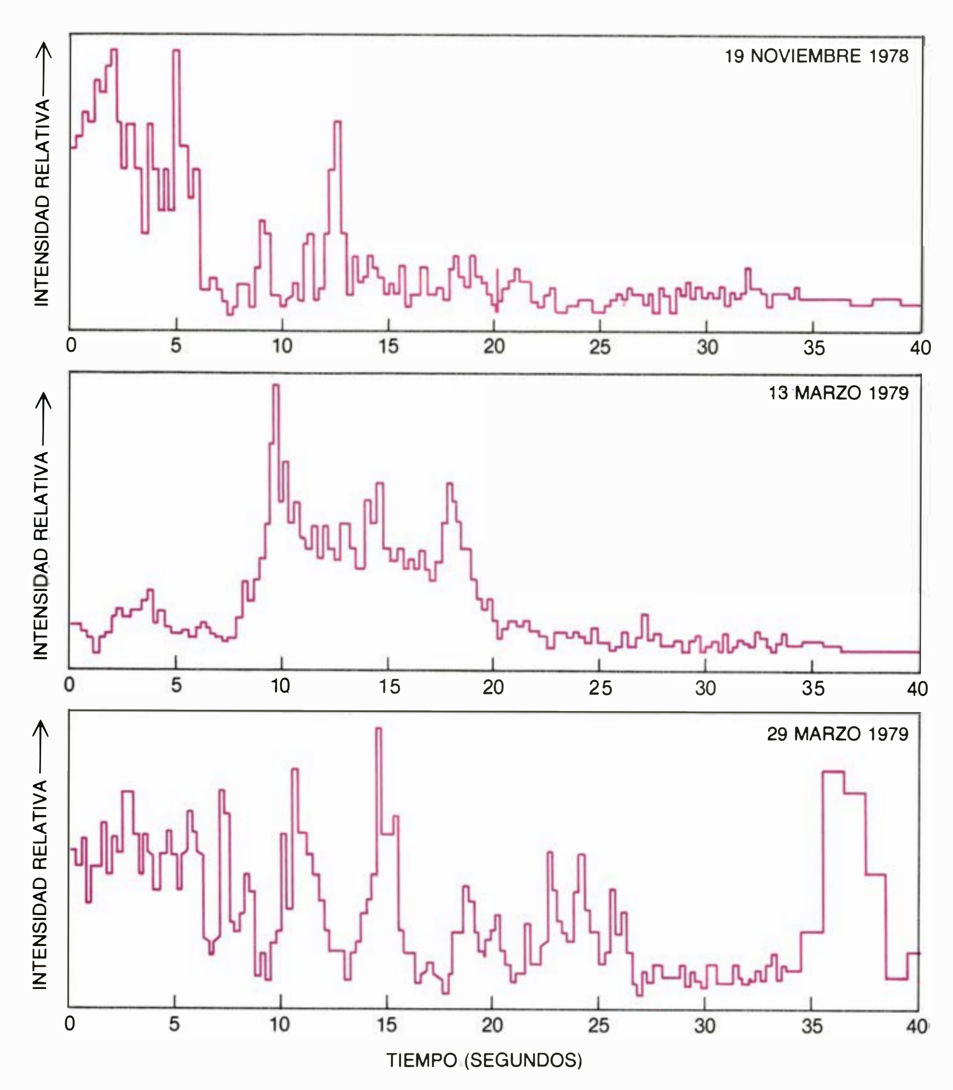
gamma son, por su propia naturaleza, menos sensibles que los detectores de radiación de menor energía.

Con tantas dificultades experimentales por delante, cabe preguntarse qué clase de datos podría permitir la distinción entre los diferentes modelos. Las observaciones de rayos gamma se componen de "curvas de luz", esto es, registros de la variación del brillo de una explosión. Puesto que toda explosión emite radiación en distintos niveles de energía, habrá que obtener varias curvas de luz (una por nivel de energía) de cada erupción. Hasta el momento se han recogido curvas de luz de varios cientos de erupciones. Con frecuencia, se han conseguido curvas de una misma erupción registradas por más de un satélite. A esta breve colección de curvas de luz se limita cuanto conocemos sobre las fuentes explosivas de rayos gamma.

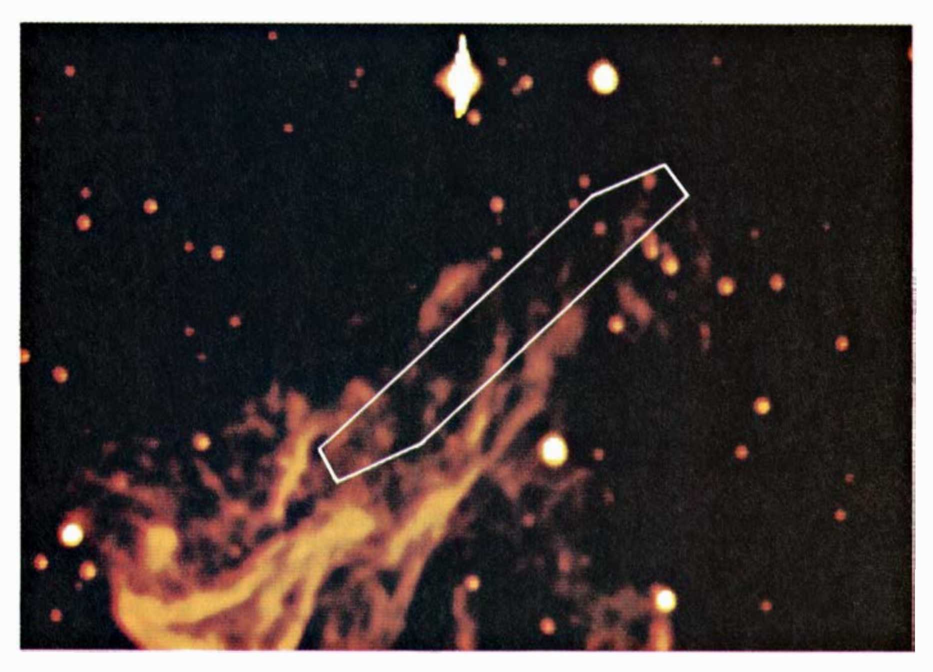
Por restringidas que nos parezca, existen formas de extraer información útil de las curvas de luz. Verbigracia, comparando las intensidades y tiempos de las curvas registradas por detectores de satélites diferentes, los investigadores establecen la posición de una erup-



1. MODELOS DE FUENTES EXPLOSIVAS de rayos gamma. Han proliferado ante la escasez de datos observacionales que aporten pruebas definitivas de los mismos. Los modelos más probables se basan en las estrellas de neutrones. En *a* parte de la materia de una estrella compañera relativamente débil (*en rojo*) se acumula en un disco centrado en la estrella de neutrones; es arrastrada luego a lo largo de las líneas del campo magnético de la misma (*en verde*) hacia el polo magnético. Con su acumulación en el polo, la materia se comprime y calienta; acaba explotando con emisión de rayos gamma. En *b* la estrella sufre un movimiento sísmico en el núcleo. El seísmo se propaga hasta la superficie, donde las ondas de choque producen rayos gamma. Otro modelo, *c*, atribuye las erupciones a las irregularidades del campo magnético de la estrella de neutrones: las líneas de campo muy irregulares pueden volverse inestables y convertirse en una línea cerrada por encima de la superficie de la estrella, que se contrae y desaparece. La gran cantidad de energía contenida en la parte irregular del campo magnético se emite en forma de radiación electromagnética, una fracción de la cual será a través de rayos gamma. Las erupciones podrían tener también su origen en el impacto de un cometa o asteroide (*d*) en la superficie de una estrella de neutrones (*trayectoria blanca*). Debido al intenso campo gravitacional de que goza la estrella, una colisión semejante desarrollaría la energía suficiente para producir pulsos de rayos gamma.



2. INDICAN LAS CURVAS DE LUZ cómo varía el brillo de una erupción con el tiempo. Estas tres curvas, conseguidas por el detector soviético "Konus", describen tres erupciones diferentes. Las curvas no muestran una estructura coherente. Lo que resulta frustrante, pues las curvas de luz constituyen uno de los pocos datos observacionales inequívocos que se consiguen de las explosiones de rayos gamma.



3. POSICION de la insólita erupción ocurrida el 5 de marzo de 1979 (cuyo contorno se indica). Se determinó con precisión. La erupción fue registrada por 11 detectores, muy alejados unos de otros en el Sistema Solar. Su posición se dedujo comparando los tiempos en que la observaron varios de ellos.

ción en el cielo con cierta exactitud. Cotejando, para una misma erupción, las curvas de luz de niveles de energía diferentes, es también posible determinar su espectro, es decir, las intensidades relativas de las diferentes energías de la radiación que lo constituye.

La forma del espectro de un objeto puede revelarnos datos de la naturaleza de dicho objeto: su temperatura y tamaño. Muchos investigadores han examinado los espectros de las erupciones observadas, en el propósito de identificar los procesos de emisión que los causan. Aunque se conocen varios procesos de radiación diferentes que podrían producir espectros como los observados en las explosiones de rayos gamma, ninguno de ellos explica satisfactoriamente la forma espectral de todas las explosiones.

Desde luego, sería sorprendente que alguno de estos mecanismos teóricos explicara los espectros de las explosiones: cada mecanismo es válido sólo en condiciones idealizadas –con un solo valor de la temperatura, de la intensidad y orientación del campo magnético, en un instante de tiempo fijo–; la situación real quizá guarde una relación compleja con las circunstancias descritas en los modelos idealizados.

A pesar de no ser demasiado útil para determinar las propiedades de la región irradiante, los datos espectrales contienen información relativa al espacio que rodea a dicha zona emisora. Si esa región absorbiera o emitiera radiación en una de las frecuencias contenidas en la explosión, en el espectro observado de la misma debería aparecer una línea. Lo cierto es que el experimento soviético Konus encontró tales líneas en un 15 por ciento de los estallidos detectados, generalmente en la región entre los 40 y 70 KeV (1 KeV equivale a 1000 electronvolt). Geoffrey J. Hueter, de la Universidad de California en San Diego, halló nuevas pruebas de la existencia de estas líneas, independientes de la anterior, en datos recogidos por el satélite *HEAD-1*.

Ningún otro detector, aparte de los que llevaban los satélites Konus y HEAO, ha encontrado líneas semejantes; algunos investigadores han conjeturado que los resultados del Konus y del HEAO podían obedecer a errores de calibración. Es difícil calibrar el rendimiento de un detector en la región espectral entre 40 y 70 KeV, debido a la respuesta complicada causada por el yodo del instrumento. Ahora bien, el análisis detallado de los experimentos Konus y *HEAO-1* apoya la creencia de que están bien calibrados. Parece, por tanto, que podemos suponer, sin mayor

riesgo de error, que las líneas espectrales forman parte de los estallidos.

La hipótesis común relativa al origen de las líneas lo atribuye a la "emisión ciclotrón", radiación que se produce a frecuencias bien definidas cuando los electrones ejecutan un movimiento circular rápido en un campo magnético intenso. Según otra explicación, la radiación de la explosión procedería de dos fuentes, muy próximas entre sí y cada una caracterizada por un espectro diferente. Según este modelo, la separación angular de las dos fuentes vistas desde la Tierra sería tan pequeña que la radiación procedente de ellas parecería dimanar de una sola fuente. Es posible que, al superponer dos espectros, resulte otro con tales líneas.

Mientras que la información espectral puede usarse para determinar el mecanismo productor de las erupciones, la información acerca de las intensidades de las explosiones observadas sirve para decidir si las fuentes se encuentran distribuidas en el espacio de forma isótropa (es decir, uniforme). Cabría realizar en este sentido una representación gráfica del número de erupciones que sobrepasan un determinado nivel de intensidad [*véase* la *figura 6*]. En el caso de que las explosiones se hallaran distribuidas uniformemente, los puntos de la gráfica caerían sobre una línea recta con una cierta pendiente, caso de utilizar una escala logarítmica. Si muchas de las fuentes explosivas de rayos gamma se encontrasen a la misma distancia de la Tierra, el gráfico presentaría una irregularidad en el valor de la intensidad correspondiente a las fuentes observadas a dicha distancia.

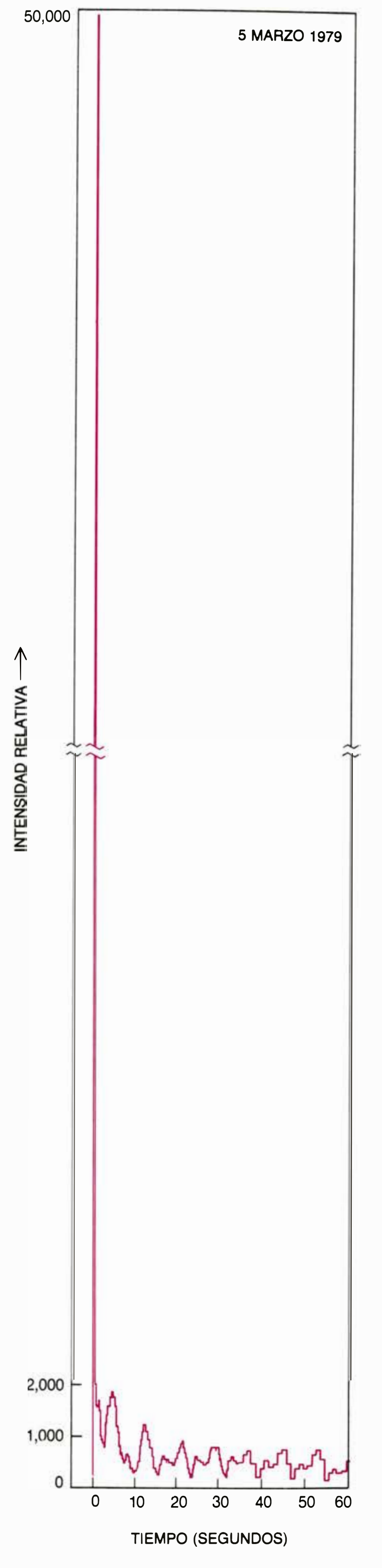
A bajas intensidades, el gráfico se curva, apartándose de la línea recta. Sin embargo, faltan datos para mostrarse seguros de la importancia estadística de esta desviación. La explicación más sencilla de la forma observada de la curva sería aquella según la cual las fuentes próximas se distribuirían de una manera uniforme, mientras que las fuentes distantes se agruparían en el espacio, quedando grandes regiones con pocas fuentes, si no carentes del todo. Una situación como ésta podría darse de forma natural si las fuentes se alojaran en una región de la galaxia en disco. Por desgracia, muchos otros tipos de distribuciones podrían explicar también los datos.

Más aún, la curva parece discrepar de cuanto se conoce hasta ahora en lo relativo a las posiciones de las erupciones observadas. De acuerdo con la curva, las fuentes distantes no se distribuirían uniformemente en el espacio. Por tanto, deberían aparecer concentradas en alguna dirección del cielo; en la del plano galáctico o en la de algún cúmulo de galaxias cercano. Sin embargo, como observó, en 1981, Mark Jennings, de la Universidad de California en Riverside, las erupciones débiles parecen gozar de una distribución uniforme. Cinco explicaciones se han propuesto hasta la fecha para solucionar el problema. Las cinco, aunque aceptables, se excluyen mutuamente.

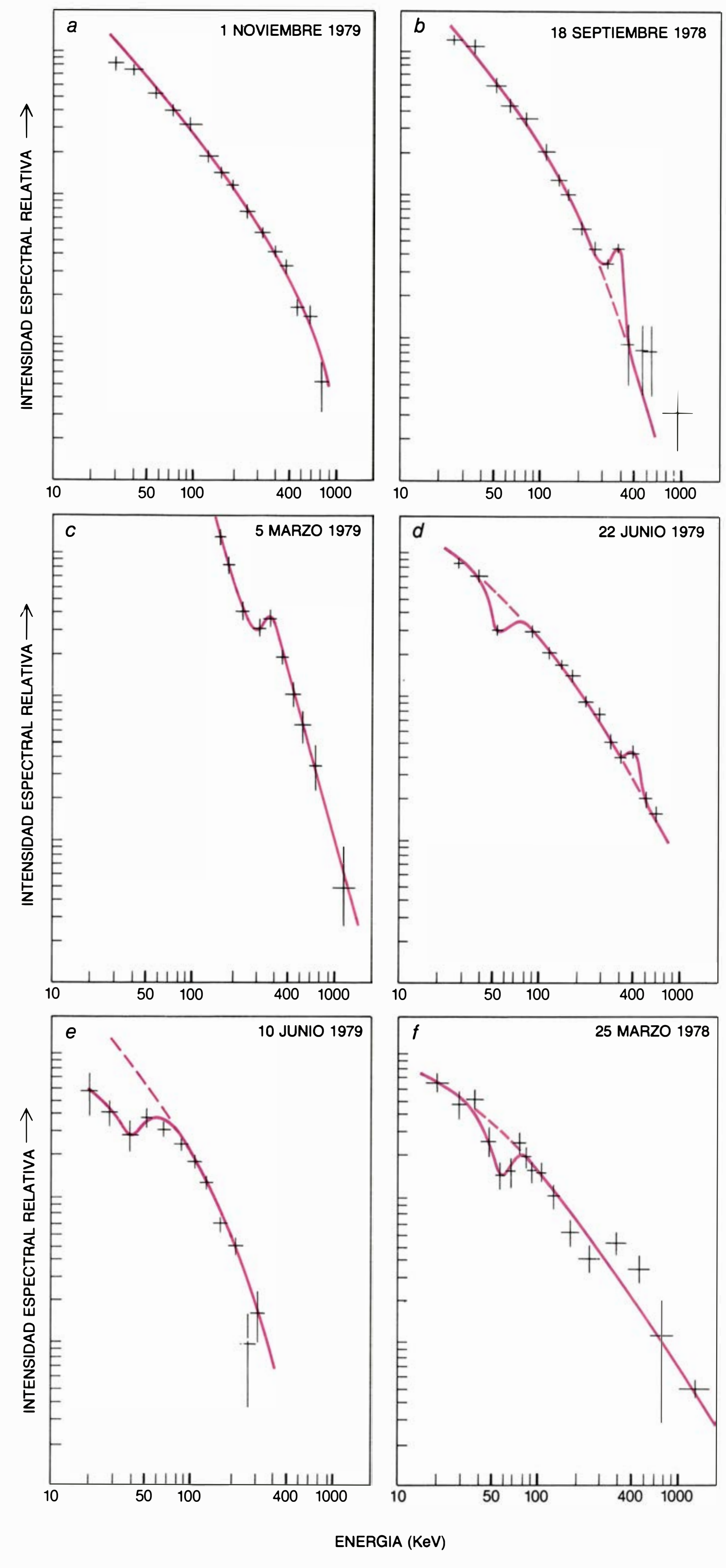
El panorama que hemos descrito resulta algo sombrío. Gran parte de la información observacional básica se resiente de las limitaciones de los sistemas de detección. Aun cuando se acepten, los datos admiten siempre explicaciones diversas. Lo que induce a plantearnos la existencia de algún dato conocido que ataña a la naturaleza de las fuentes explosivas de rayos gamma.

Por suerte, la situación quizá no sea tan mala como la he venido pintando. En los últimos años, distintos investigadores han llegado a puntos coincidentes por lo que a ciertas propiedades de las fuentes explosivas se refiere. Este acuerdo se centra en tres hechos básicos: primero, en el fenómeno de la erupción de rayos gamma hay siempre involucrada una estrella de neutrones; segundo, la estrella de neutrones posee un campo magnético intenso; finalmente, la mayor parte de las fuentes explosivas observadas se albergan en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Aunque no haya pruebas concluyentes a su favor, y se pueda estar en razonable desacuerdo con todos ellos, tomados en conjunto, estos puntos aportan la explicación más plausible de los datos conocidos.

El punto central de este reciente consenso reside en el convencimiento de la implicación de una estrella de neutrones en toda explosión de rayos gamma. La de neutrones es una estrella muy pequeña y densa, formada en las últimas fases de la evolución estelar. Su radio viene a medir unos 10 kilómetros; su densidad central supera los 60 millones de toneladas por centímetro cúbico. La gravedad en la superficie de una estrella de neutrones y su campo magnético, ambos enormemente elevados, contie-



4. CARACTERISTICAS INSOLITAS de la explosión del 5 de marzo ofrecidas en su curva de luz. Su intensidad aumentó en menos de 0,0002 segundos hasta un máximo que multiplicó por 10 el brillo de la más luminosa erupción hasta ahora conocida. En la fase de debilitamiento, la intensidad de la explosión osciló con un período de unos ocho segundos. Nos hallamos ante el único caso comprobado de periodicidad en una erupción gamma.



nen energía suficiente para provocar una explosión de rayos gamma; ya se han propuesto muchos mecanismos posibles de conversión de la energía de estas fuentes en radiación gamma. Otro motivo que atrae a los teóricos hacia los modelos con estrellas de neutrones es el saber que éstas existen y son objetos comunes en nuestra galaxia.

Todas estas razones teóricas abonan la hipótesis verosímil en cuya virtud una fuente explosiva de rayos gamma poseería una estrella de neutrones. Si nos atenemos a ciertos datos, habría que sustituir el adjetivo verosímil por probable. Uno de estos hechos observacionales es el brevísimo intervalo de tiempo en que varía la intensidad de las erupciones. Algunas erupciones duraron sólo 0,01 segundos, mientras que una explosión ocurrida el 5 de marzo de 1979 aumentó su intensidad en 0,0002 segundos. Habida cuenta de que una fuente no puede cambiar significativamente su brillo en un tiempo inferior al que emplea la luz en atravesar la región que ocupa, el tamaño de la fuente explosiva del 5 de marzo será inferior a 0,0002 segundos-luz, unos 60 kilómetros. Existen pocos objetos astronómicos que satisfagan tales limitaciones de tamaño o que dispongan de energía suficiente para desencadenar una explosión así. La estrella de neutrones satisface ambos requisitos.

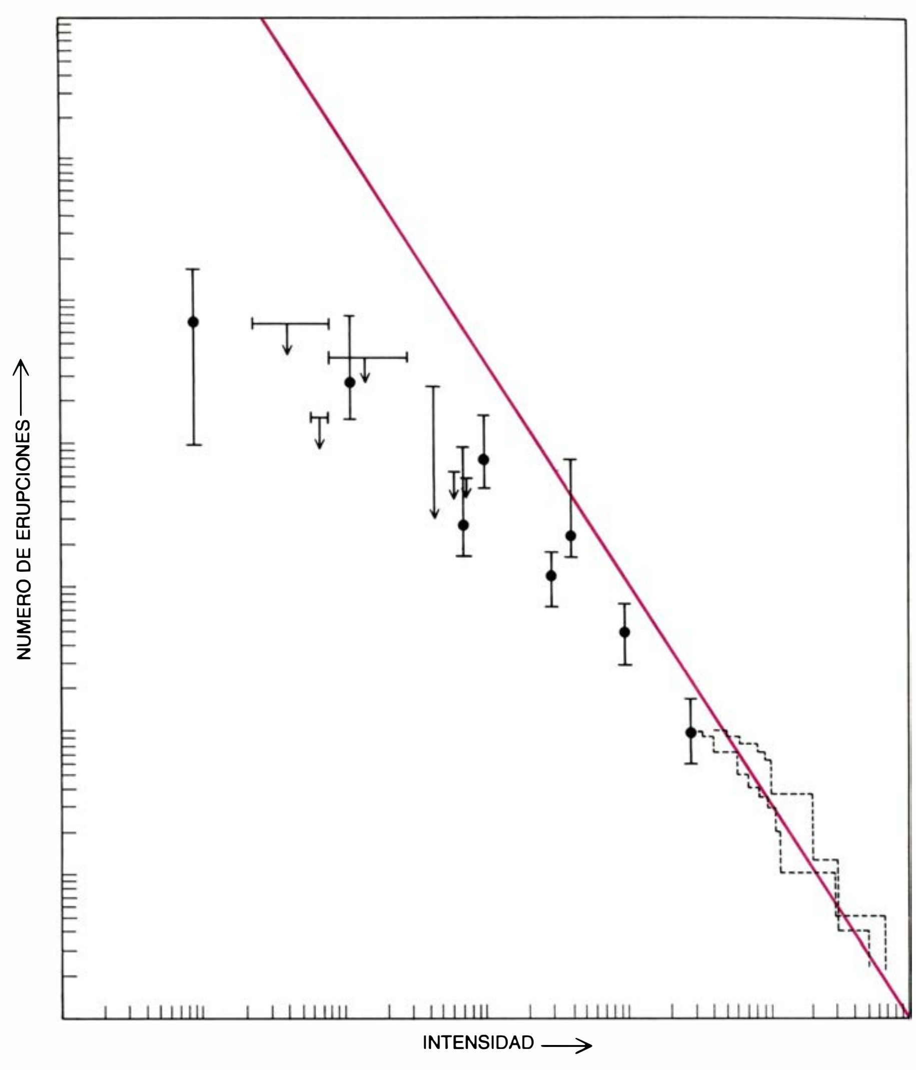
Otro argumento observacional que apoya la hipótesis de la relación entre las estrellas de neutrones y las explosiones de rayos gamma se basa en una peculiaridad encontrada en el 7 por ciento de los espectros de las explosiones, aproximadamente. Dichos espectros presentan una línea en torno a los 420 KeV. Hay pocos procesos que emitan una línea destacada con esa energía; la hipótesis más plausible es que tal línea se forma en el choque de electrones con sus antipartículas, los positrones. Una colisión semejante produciría el aniquilamiento total de ambas partículas y originaría la conversión de la energía correspondiente a su masa en dos rayos gamma. En condiciones normales, cada rayo gamma tendría una energía de 511 KeV, pero si el proceso de aniquilación mutua se desarrolla

5. ESPECTROS de las explosiones de rayos gamma. Nos indican la naturaleza del fenómeno eruptivo. Algunas erupciones presentan fenómenos de absorción o emisión entre 40 y 70 KeV (*d*, *e*, *f*) que pueden deberse a electrones en movimiento circular rápido en un campo magnético intenso, cerca de la fuente de la explosión. Otra característica destacada de algunos espectros (*b*,*c*,*d*), una línea de emisión cerca de los 420 KeV, podría resultar de colisiones entre electrones y positrones.

cerca de la superficie de una estrella de neutrones, los rayos gamma habrán de salir del pozo de potencial gravitatorio de la estrella de neutrones antes de llegar a la Tierra, con la consiguiente pérdida de energía. (Esta pérdida de energía, predicha por la teoría general de la relatividad, se llama corrimiento hacia el rojo gravitacional.) Los rayos gamma habrían de perder la energía necesaria para dar lugar a la diferencia entre los 511 KeV a que fueron emitidos y los 420 KeV en que las fuentes explosivas de rayos gamma poseen líneas de emisión.

Otra prueba de que las estrellas de neutrones forman parte del fenómeno de las fuentes explosivas de rayos gamma nos la ofrece también la explosión del 5 de marzo de 1979. La explosión ocurrió en un punto de la bóveda celeste cercano a un resto de supernova. Dejándonos guiar por las apariencias, diríamos que la fuente explosiva está probablemente relacionada con los restos de una supernova. Puesto que las estrellas de neutrones se forman muchas veces tras una explosión de supernova, es razonable suponer que una estrella de neutrones intervino en la erupción del 5 de marzo.

Pero hay más a considerar en esa erupción: su brillo osciló con un período de ocho segundos aproximadamente. Muchas de las emisiones periódicas que aparecen en astronomía pueden explicarse por la rotación de una estrella; en virtud de la rotación de la estrella, un haz de radiación emitido por una región limitada de la superficie estelar alcanza periódicamente la Tierra. Un período de rotación de ocho segundos, demasiado rápido para la mayoría de las estrellas, es normal en las estrellas de neutrones.



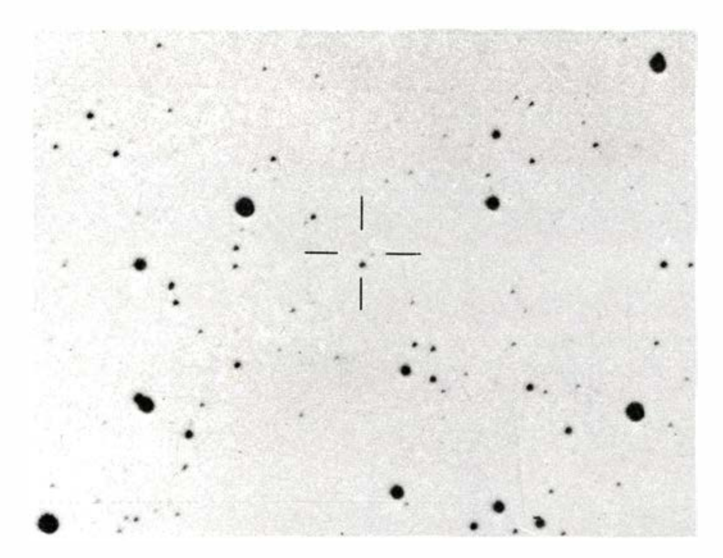
6. DISTRIBUCION ESPACIAL de las fuentes explosivas. Para calibrarla se representa el número de explosiones más brillantes que una intensidad dada. Si las fuentes explosivas estuvieran distribuidas uniformemente, la curva dibujada con escala logarítmica debería seguir una línea recta de pendiente –3/2 (*línea en color*). La desviación de la curva de esta línea recta indica que las erupciones observadas pueden no estar distribuidas uniformemente. Las líneas de trazos representan los catálogos de datos recogidos.

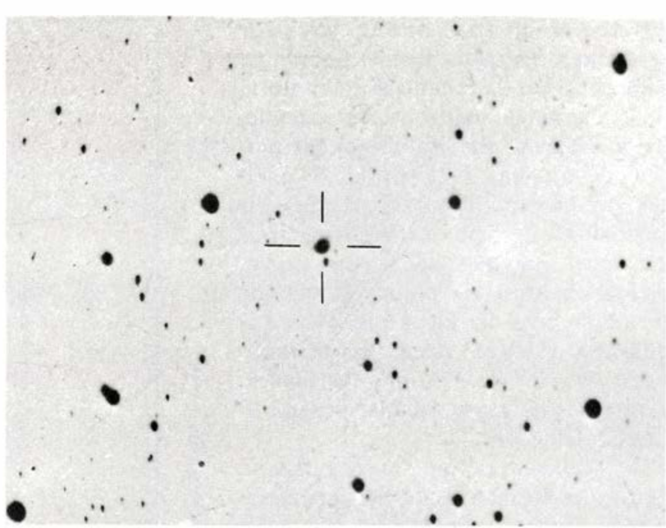
La segunda componente del consenso alcanzado recientemente sobre las estrellas de neutrones se refiere al campo magnético intenso que forma parte del fenómeno. De nuevo nos encontramos aquí con que ninguna de las pruebas que apoyan esta hipótesis es convincente por sí sola; para su interpretación no es preciso recurrir a la existencia de un campo magnético. Sin embargo, tomadas en conjunto, constituyen un entramado razonable en favor de la inclusión de un campo magnético fuerte en la teoría de las fuentes explosivas de rayos gamma.

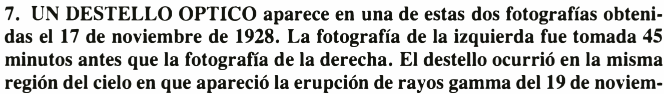
De esos argumentos, uno de los más sólidos se basa en la observación de líneas de emisión o absorción en la región entre 40 y 70 KeV. Si es cierto que estas líneas se deben al movimiento circular de electrones, el campo magnético que los fuerza a seguir órbitas circulares debe ser del orden de 10^{12} gauss (compárese con el campo magnético terrestre que ronda el medio gauss). Si el campo magnético fuera mucho más débil, los electrones emitirían radiación de ciclotrón, de menor energía.

Otro argumento busca apoyo en la periodicidad de 8 segundos observada en la explosión del 5 de marzo de 1979. Tal modulación se debía, probablemente, a la rotación de una estrella de neutrones: alguna región emisora de la estrella entraba y salía periódicamente del campo de visión de la Tierra. Dicha región no podía encontrarse en uno de los polos de la estrella, donde el eje de rotación corta la superficie de la misma, pues en tal caso la región no giraría, ni pasaría periódicamente por la línea de visión de la Tierra. Por tanto, hubo algún mecanismo, asimétrico respecto del eje de rotación, que determinó la localización de la región emisora sobre la superficie estelar. Un candidato probable de mecanismo que "rompe la simetría" es un campo magnético cuyo eje no esté alineado con el eje de rotación de la estrella.

La hipótesis de la presencia de un campo magnético en una fuente explosiva de rayos gamma se funda en deducciones teóricas y en datos de observación. Uno de los argumentos más sólidos: cualquier región que emita rayos gamma debe estar confinada por alguna fuerza. En caso contrario, la presión de radiación causada por los rayos gamma la llevaría a expandirse rápidamente. Si la región se expandiera en demasía, su densidad descendería tanto que no podría seguir emitiendo rayos gamma. Ni siquiera la altísima gravedad superficial de una estrella de neutrones resulta adecuada para confinar una fuente intensa de rayos gamma. Sin embargo, sí podría bastar un campo magnético de 10^{12} gauss.







7. UN DESTELLO OPTICO aparece en una de estas dos fotografías obtenidas el 17 de noviembre de 1928. La fotografía de la izquierda fue tomada 45 minutos antes que la fotografía de la derecha. El destello ocurrió en la misma región del cielo en que apareció la erupción de rayos gamma del 19 de noviembre de 1979. Las imágenes de las estrellas en la fotografía de la derecha son alargadas (dejan una pequeña "estela") debido a que el seguimiento del telescopio no era perfecto. El destello no dejó estela, lo que manifiesta que su duración fue sensiblemente más corta que el tiempo total de exposición.

Vayamos con el tercer rasgo distintivo del consenso alcanzado recientemente: la mayoría de las fuentes explosivas de rayos gamma se encuentran en nuestra galaxia. Trabaja en favor de esta hipótesis la gran cantidad de energía que estas fuentes deberían producir si fueran extragalácticas. Una fuente explosiva de la Vía Láctea tendría que producir, en números redondos, 10^{38} erg de energía para conseguir el brillo que se observa desde la Tierra; una fuente explosiva extragaláctica habría de liberar 10^{46} erg, por lo menos, para alcanzar el mismo nivel de brillo. Mientras que es relativamente fácil construir modelos de procesos que pueden producir 10^{38} erg, se plantean graves dificultades si se quiere crear un modelo que produzca hasta 10^{46} erg.

Hay otro argumento, basado en la representación gráfica del número de erupciones más brillantes a una intensidad dada, que apoya también la hipótesis de que las fuentes explosivas se encuentran en la Vía Láctea. Si la mayoría de las fuentes explosivas observadas quedaran fuera de la galaxia, lo más probable es que se alojasen en otras grandes acumulaciones de masa (otras galaxias o cúmulos, por ejemplo). La distribución observada de fuentes en el espacio debería ser, por tanto, irregular; habría grandes concentraciones de las mismas a diversas distancias de la Tierra. En tal caso, la representación gráfica mostraría una serie de irregularidades, en correspondencia con la lejanía de las distintas concentraciones de fuentes explosivas. La curva no presenta tal irregularidad.

Aunque el consenso actual es un buen punto de partida, su utilidad teórica está limitada por la dificultad de obtener datos de calidad de las erupciones de fotones de alta energía, cuales son los rayos gamma. Desde hacía tiempo, los astrofísicos saben que muchas dificultades podrían obviarse si hubiera forma de observar fotones de baja energía procedentes de las fuentes explosivas. Con este fin, se ha realizado un gran esfuerzo en la determinación precisa de las posiciones de tantas fuentes como fuera posible. Las posiciones se examinaron posteriormente con telescopios ópticos para comprobar si había algún fenómeno óptico asociado con las explosiones.

Con dos excepciones, los resultados de esta investigación han sido siempre negativos. La primera salvedad aconteció durante la erupción extraordinaria del 5 de marzo de 1979, identificada provisionalmente como restos de una supernova. La segunda excepción la constituyen tres destellos ópticos que el autor encontró en 1981, cuando realizaba curvas de postgraduado en el Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT). Dentro de un trabajo de búsqueda de destellos ópticos procedentes de las fuentes explosivas de rayos gamma, examiné alrededor de 30.000 fotografías del archivo de 500.000 que posee el Harvard College Observatory. Analicé todas cuantas contenían una región celeste en donde posteriormente se había observado una explosión de rayos gamma. En tres fotografías de tres regiones distintas, tomadas en 1901, 1928 y 1944, descubrí imágenes de objetos con aspecto de estrellas que no aparecían en otras fotografías de las mismas regiones. Estas imágenes, causadas por destellos ópticos, están relacionadas, a buen seguro, con las explosiones de rayos gamma observados más tarde en las mismas posiciones.

Aunque sería muy útil disponer de más datos, se puede aprender mucho con estos tres. En ese triple caso, la energía contenida en la correspondiente explosión de rayos gamma ocurrida recientemente es mil veces la energía encerrada en el destello óptico. Esta relación de 1 a 1000 puede esgrimirse, unida a otros argumentos teóricos, para probar que la estrella de neutrones causante de la explosión debe tener algún tipo de objeto acompañante, quizás una estrella débil o un disco de acreción de materia más fría.

Dado que las posiciones de las fuentes explosivas pueden determinarse con mayor precisión a partir de los datos ópticos que de los ofrecidos por rayos gamma, las tres posiciones ópticas nos han permitido llevar a cabo un rastreo exhaustivo de fuentes explosivas inactivas mediante telescopios ópticos grandes. Aunque los resultados no son concluyentes para estas tres posiciones, es evidente que las fuentes explosivas deben mostrar una extrema debilidad cuando no están en explosión.

El análisis estadístico de los tres destellos ópticos indica que las fuentes explosivas de rayos gamma deben emitir destellos semejantes con una frecuencia promedio de uno por año. En efecto, como parte de su trabajo, el autor examinó fotografías de un archivo equivalente a tres meses de 12 posiciones en que se conocían la existencia de fuentes explosivas de rayos gamma; analicé, pues, las exposiciones acumuladas de tres años. En esta colección de tres años de fotografías, descubrí tres destellos, lo que corroboraba que el interva-

lo promedio entre los destellos ópticos de una fuente explosiva de rayos gamma era de aproximadamente un año. Este resultado invalida, quizá, los modelos que no admitan la posibilidad de destellos ópticos anuales.

La consecuencia más importante de estos tres destellos es, a buen seguro, la siguiente: los astrofísicos se han sentido obligados a recordar que la observación de fuentes explosivas de rayos gamma en bajas energías es tan deseable cuan práctica.

Los próximos años asistirán a la puesta en marcha de varios experimentos que habrán de traer mayor información sobre las fuentes explosivas de rayos gamma. El más interesante es el detector de explosiones que lleva a bordo un satélite llamado Observatorio de Rayos Gamma, cuyo lanzamiento está previsto para el año 1988. Este instrumento sólo se distinguirá de los detectores anteriores en su incrementada sensibilidad. El instrumental del Observatorio detectará explosiones entre 10 y 100 veces más débiles que el experimento Konus; podrá, además, dar su localización en el cielo con un margen de error de 1 grado. Asimismo, una modificación especial del detector permitirá registrar espectros de cada estallido observado en una amplia gama de energías.

El segundo de los grandes aparatos se encuentra en las etapas finales de su construcción. Se dedicará a la búsqueda de destellos ópticos. Constará de dos partes; la primera, construida por Roland Vanderspek y George R. Ricker, Jr., del MIT, examinará la mayor parte del cielo visible rastreando cualquier aumento súbito de brillo. En menos de un segundo desde su comienzo, la posición de cualquier destello será transmitida a la segunda parte del ingenio, un telescopio óptico que puede apuntarse hacia cualquier región del cielo, igualmente en menos de un segundo. De esta parte del diseño se ocupan Bonnard J. Teegarden, Ravi Kaipa, Tycho T. von Rosenvinge y Cline, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales. Los investigadores esperan detectar unas dos docenas de erupciones por año.

Los resultados que llegarán con estos y otros ingenios deberían revelar, por fin, la causa subyacente de las erupciones de rayos gamma. A pesar del consenso reinante en la actualidad, el fenómeno de las erupciones sigue envuelto en el mayor de los misterios astrofísicos. El autor espera que llegue el día en que se disponga de datos que nos permitan correr su velo.

Ciencia y sociedad

Configuraciones cruciformes

Causa profunda sorpresa y perplejidad comprobar cómo la aceptación incondicional de la singularidad de la molécula de ADN y su relevancia en el ámbito biológico ha exigido un largo y lento proceso de mentalización científica. La causa reside en la dificultad en reconciliar las nociones de estructura y función. Cualquier actividad, por modesta o secundaria que parezca, suele revestir niveles elevados de complejidad; consecuentemente, el impulso inmediato es el de asociarla o sustentarla en organizaciones estructurales de complejidad comparable. Es ilustrativo y aleccionador comentar, aunque sea brevemente, los jalones más sobresalientes que ha recorrido el ADN en su lenta consolidación.

La presencia del ADN en los cromosomas fue detectada ya a principios de este siglo. Su identificación como depositario de una singular función genética no se entrevió hasta 1943, a raíz de los experimentos de Avery relativos a la inducción de transformaciones genéticas en la bacteria de la neumonía. La actitud inicial frente a las implicaciones de los resultados alcanzados por Avery fue de aprensión y desconfianza. El motivo es explicable. El ADN se consideraba una sustancia "insulsa" por tratarse de una larga cadena polimérica de textura fibrosa, de carácter repetitivo y monótono, claramente inapropiada para contener especificidad alguna. El obstáculo continuaba siendo cómo conciliar las exigencias de la especificidad genética con la identidad química de la molécula. La elucidación por Watson y Crick de la estructura helicoidal de la molécula de ADN, diez años más tarde, supone el tercer hito en el proceso de su reconocimiento. El requisito de la complejidad estaba tan arraigado, que la propia resolución de la estructura molecular no consiguió disipar plenamente el clima de recelo suscitado por la naturaleza del ADN. Se persistía en no descartar la posibilidad de una activa participación del complemento proteico del cromosoma.

La resolución de la estructura bicatenaria del ADN abrió el camino hacia la comprensión de su especificidad, convirtiéndose en el elemento impulsor del cambio de enfoque conceptual. Esto último supuso abandonar la errónea preconcepción del binomio complejidad-funcionalidad; también ésta podía sustentarse en la más estricta simplicidad. Las características de la doble hélice son muy sencillas y de inmediato sugieren, como así se indicó en el propio artículo original publicado en la revista *Nature*, los mecanismos por los cuales el material genético se duplica, la información es almacenada y ésta controla las secuencias de aminoácidos en las proteínas. Paradójicamente, la propia simplicidad estructural dificultó entrever que la especificidad pudiese venir determinada por una secuencia o un código.

El cuarto hito en el proceso de formación de nuestra idea de la molécula de ADN: la estricta dependencia entre la expresión de las secuencias inscritas en el ADN y la conformación estructural que puedan adoptar sus cadenas. El flujo de la información resulta condicionado por la disposición estructural, no ya de toda la molécula, sino incluso de pequeñas regiones de las cadenas. Ha sido necesario el desarrollo de todo un arsenal tecnológico para percatarse de la realidad polimórfica del ADN y sus decisivas implicaciones sobre su funcionalidad. La expresión de la información genética depende, cualitativamente, de la secuencia del ADN, pero su modulación cuantitativa queda determinada por la conformación estructural. Las múltiples configuraciones que puede adoptar la molécula catenada y que paulatinamente se van descubriendo indican una enorme versatilidad de la molécula y pone sobre la mesa una dimensión de control y regulación genéticos impensable poco tiempo atrás. Para ilustrar este aserto sirva el comentario siguiente sobre estructuras cruciformes en el ADN.

Las configuraciones cruciformes en el ADN no son un capricho o veleidad genéticos, sino que constituyen la adecuación estructural a precisas y estrictas necesidades biológicas, siendo asimismo un claro ejemplo de adaptación conformacional a la especificidad de secuencia. Este tipo de configuración ramificada en cruz se forma durante el intercambio recíproco de tramos de hebras simples entre moléculas bicatenarias de ADN. Este intercambio requiere escisiones previas en las cadenas y su ulterior unión o reparación. El caso más notable de estructura cruciforme es el conocido por cruce cuádruple Holliday, en honor de su descubridor, y que se considera esencial en los mecanismos moleculares de recombinación genética homóloga.

Este proceso de recombinación ocurre al aparearse cromosomas homólogos durante la división meiótica; entraña el entrecruzamiento entre segmentos monocatenarios, transitoriamente desgajados de las cadenas dobles, y la posterior formación de regiones heterodúplex. Estas últimas consisten en hebras dobles cuya complementaridad no es exacta, y por tanto se distinguen por adoptar localmente geometrías en bulbo, bucle o burbuja.

Todos los modelos estructurales construidos para explicar los diferentes tipos conocidos de recombinación genética implican la adopción de configuraciones intermediarias fugaces en forma de *X* o *H*. Estas estructuras, entrevistas hace ya cincuenta años al observarse mediante técnicas citológicas el apareamiento de cromosomas, han sido plenamente confirmadas en el plano molecular por microscopía electrónica.

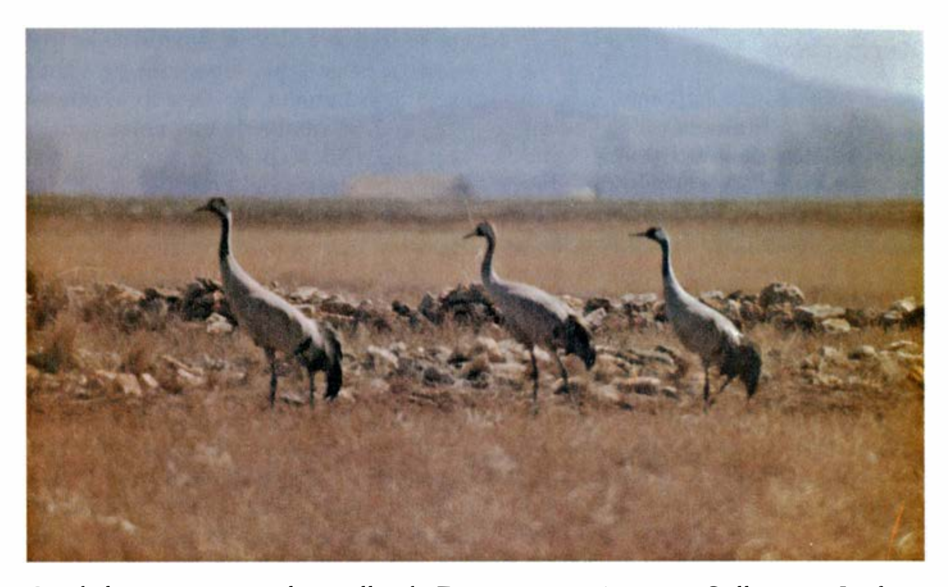
Las estructuras cruciformes ofrecen un notable interés por dos motivos principales. En primer lugar, exhiben unas características distintivas que las diferencian de la configuración helicoidal regular. Esta circunstancia determina la existencia en la célula de moléculas enzimáticas con el cometido específico de su resolución y procesamiento. La búsqueda y ulterior estudio de estas últimas es de un interés obvio. El segundo aspecto relevante que muestran estas estructuras es su efecto o repercusión sobre regiones adyacentes o colindantes en la molécula de ADN. No es, pues, de extrañar que estas estructuras cruciformes hayan sido objeto de reciente atención y que, en consecuencia, se haya logrado su generación *in vitro* mediante estrategias experimentales diversas. Entre ellas sobresalen la recombinación acelular, el aislamiento de formas intermediarias en levadura, la hibridación molecular e incluso la construcción por síntesis química.

La estabilidad termodinámica de las estructuras cruciformes es menor que la normal en el ADN bicatenario; por tanto, su energía libre de formación será menos favorable. Sin embargo, este aparente defecto viene compensado por la generación de propiedades

friccionales singulares que inducen una sensible relajación topológica de la molécula, en virtud de la constricción torsional que experimenta. Esta relajación modifica drásticamente el comportamiento local del ADN frente a la acción de enzimas nucleolíticas.

A pesar de que en un principio las configuraciones cruciformes puedan parecer una curiosidad biológica, la realidad basada en los resultados que se van produciendo contradice esta impresión inicial. Lenta pero gradualmente va emergiendo la idea de que su participación en los mecanismos moleculares que soportan la funcionalidad biológica no es secundaria ni trivial. Recientemente se han detectado estructuras ramificadas, no ya en el ADN, sino en transcritos primarios de ARN en fase de procesamiento. Estos resultados sustentan la posible intervención de este tipo de configuraciones en mecanismos tan esenciales como la escisión y engarce (*splicing*) de las secuencias viables o exones inscritos en los precursores. Desde el punto de vista geométrico, la ramificación de las cadenas es estéricamente muy favorable para su entrecruzamiento e intercambio.

A medida que se profundiza en el conocimiento de los procesos biológicos se va manifestando paulatinamente la naturaleza polimórfica de los ácidos nucleicos y se consolida la noción de una íntima y recíproca dependencia entre organización estructural y funcionalidad genética. Desde que se contemplaba al ADN con recelo y desconfianza, atribuyéndosele una tediosa monotonía, hasta hoy, el pensamiento científico ha evolucionado realizando un largo rodeo para recorrer la mínima distancia de separación entre la estructura y la función. (Luis Cornudella.)



Desde los años setenta, las grullas de Europa se estacionan en Gallocanta. La fotografía ha sorprendido a una escena familiar, con el joven entre sus padres

Grullas en Gallocanta

En el curso de sus migraciones de primavera y otoño, gran parte de las grullas invernantes en nuestra península se remansan en los aledaños de la laguna de Gallocanta. Durante varias primaveras consecutivas hemos venido observando la formación de las congregaciones de grullas, previas a la migración prenupcial, así como el despegue matutino de las bandas que emprenden viaje hacia Europa septentrional.

La laguna de Gallocanta está situada en el extremo sudoeste de la provincia de Zaragoza, limítrofe con la de Teruel y muy próxima a Guadalajara. Tiene una longitud de ocho kilómetros por tres en su parte más ancha, siendo muy escasa su profundidad y de nivel sumamente variable. Situada a 990 metros sobre el nivel del mar, se alimenta de una cuenca cerrada que comprende unas 53.000 hectáreas. Gallocanta se caracteriza, además, por su gran riqueza en anátidas: en períodos punta, con altos niveles de agua, ha acogido hasta 250.000 patos y fochas.

Las grullas (*Grus grus*) son aves zancudas que alcanzan una longitud de hasta 1,20 metros, elegantes y esbeltas. Su coloración general es gris, con negro en la parte superior de la cabeza, cuello y alas (plumas remeras); blanco en mejillas y lados del cuello, y mancha roja que destaca en el occipucio; es muy característico el frondoso penacho de plumas que le tapan la cola. Destacan por su notable longevidad –cifrable en unos cincuenta años–, su comportamiento monogámico y unión de las familias durante la invernada, su disciplinada organización social, su típica formación de vuelo en "V" hasta alturas controladas de 6600 metros, sobre los Himalayas, sus danzas nupciales y su reclamo atrompeteado. Existen catorce especies, repartidas por todos los continentes, con la excepción de Sudamérica. Algunas de ellas se encuentran en gravísimo peligro de extinción: la siberiana, la japonesa y la americana.

En Europa, las grullas anidan en la península escandinava, países bálticos y Rusia, aparte de poblaciones relictas en Turquía. Antiguamente ocupaban una área mucho más extensa. (Hasta los años cincuenta criaban en la laguna de la Janda, hoy desecada.) La especie ocupa gran parte de Siberia. En otoño, las grullas procedentes de parte de Escandinavia y de los países bálticos se encaminan a sus cuarteles de invierno situados principalmente en Extremadura y Andalucía, siguiendo la ruta llamada del sudoeste, que forma un estrecho corredor de doscientos a trescientos kilómetros que, desde el Báltico, pasa por Niedersachsen (Holanda), cruza Bélgica, el centro-oeste francés, rebasa los Pirineos y, desde los años setenta, se estaciona precisamente en Gallocanta, donde se reúne temporalmente gran parte de la población de grullas de procedencia occidental, hasta su ulterior dispersión por las áreas de invernada propiamente dichas. A finales de octubre y primeros de noviembre se produce la entrada masiva en Gallocanta, donde permanece gran número de aves hasta mediados de diciembre.

En primavera se rehace el proceso. Las grullas, que han pasado los meses más fríos en Extremadura y Andalucía, afluyen paulatinamente a la cuenca de Gallocanta a medida que avanza febrero. Allí se alimentan en los sembrados, básicamente de semillas superficiales que no germinan, con escaso daño para la agricultura, hasta alcanzar el máximo –de unos siete mil ejemplares– a primeros de marzo. En esta época inician la migración en bandadas no superiores al centenar de ejemplares, que en vuelo batido trasponen los montes que cierran el círculo de la cuenca lacustre en dirección al Pirineo. Así recorrerán, en sentido inverso, el camino que siguieron en otoño. Y si la meteorología se mantiene favorable, en pocos días Gallocanta puede vaciarse de estos huéspedes de paso. (Joaquim Maluquer Sostres.)

Angiogénesis

En 1961, Judah Folkman, a la sazón en el Instituto Naval de Investigación Médica de los Estados Unidos, cayó en la cuenta de que los tumores que crecieran por encima del par de milímetros habrían de desarrollar su propia red de vasos sanguíneos. De ser así, la inhibición de la angiogénesis (formación de vasos sanguíneos) quizás impidiera el crecimiento de los tumores.

Durante los últimos 20 años, trabajando en la Facultad de Medicina de Harvard, Folkman ha perseguido pruebas concluyentes que demostraran que los tumores macizos promueven el crecimiento de un sistema vascular propio. Lo consiguen por medio de la secreción de un factor angiogenético tumoral, que estimula la proliferación de las células endoteliales que constituyen los capilares. En 1984, Folkman y sus colegas lograron purificar el tal factor, a la par que creían haber descubierto un modo de inhibir su actividad.

Para verificar su hipótesis, Folkman y colaboradores desarrollaron nuevas técnicas de cultivo de tumores en un ambiente aislado de vasos sanguíneos (en el interior de una cámara de filtrado o en tejidos avasculares) y de cultivo de células endoteliales. Empeñaron varios años de trabajo antes de demostrar que, en efecto, los tumores segregan un factor de crecimiento de células endoteliales, que estimula la angiogénesis. Mas no consiguieron aislar el factor puro.

Empezó a abrirse el camino hacia la purificación cuando, en el propio laboratorio de Folkman, se advirtió que la heparina promovía la migración de las células endoteliales, incrementando con ello el ritmo de angiogénesis. La heparina, polisacárido (azúcar complejo) que se haya en muchos tejidos, suele emplearse como fármaco para inhibir la coagulación. Yuen Shing y Michael Klagsbrun consideraron que quizás ese incremento de la angiogénesis respondiera al aumento de la concentración de un factor de crecimiento en la superficie de las células de crecimiento. Para aprovechar esa supuesta afinidad del factor por la heparina, revistieron los granos de gel de una columna de filtrado con heparina y eluyeron por la columna un factor parcialmente purificado y aislado a partir de un condrosarcoma, un tumor de células cartilaginosas.

La mayor parte del factor en crudo atravesó la columna. La porción que quedó unida al gen forrado de heparina se separó de ésta y se sometió a electroforesis en gel, que separa las proteínas según su tamaño. Se descubrió entonces que se trataba de una única proteína pequeña, y, por añadidura, un potente promotor del crecimiento de las células endoteliales y de la angiogénesis.

Shing y Klagsbrun aventuran que la sustancia derivada del condrosarcoma pudiera ser un factor de crecimiento presente normalmente en el cartílago, donde estimularía la vascularización que precede a la transformación del cartílago en hueso. En otras palabras: ese factor tumoral de angiogénesis probablemente no sea exclusivo de las células tumorales; quizá se trate de un factor de crecimiento normal, que se activa en un momento inadecuado o se mantiene activo demasiado tiempo.

Se ha comprobado que la heparina participa también en la inhibición de la angiogénesis. En ensayos sobre el fomento de la angiogénesis en membranas de embrión de pollo, Stephanie Taylor añadió la hormona esteroidea cortisona a la heparina para evitar inflamaciones. La angiogénesis se detuvo; los vasos sanguíneos desaparecieron de un disco impregnado con ambos fármacos. Ninguno de ellos, por separado, ejercía ese efecto. En administración oral a ratones, el compuesto de heparina y cortisona provocó la reducción de algunos tipos de tumores.

Terapia genética

La ciencia estará dentro de poco preparada para iniciar el ensayo de métodos terapéuticos de ADN recombinante para el tratamiento de trastornos genéticos. Tales técnicas se aplicarían sólo a ciertas células somáticas (las que no intervienen en la reproducción); no generarían alteraciones heredables en el ADN de los pacientes ni afectarían al acervo genético humano. A pesar de esas cautelas, la perspectiva de una terapia genética ha provocado lógicas inquietudes sociales.

Para salir al paso de esa preocupación pública, un grupo de trabajo adscrito al Comité Consultivo sobre ADN recombinante (RAC), de los Institutos Nacionales de la Salud de los Estados Unidos, ha publicado el borrador de un documento titulado "Puntos a considerar en el diseño y sumisión de protocolos de terapias génicas a células somáticas humanas".

Entre las enfermedades susceptibles de tratamiento con terapias génicas se cuentan los trastornos del sistema inmune que se presentan al carecerse de alguna enzima. En el tratamiento de esas enfermedades se extraería parte de la médula ósea del paciente y se infectaría ésta con un virus al que se habría incorporado un gen activo. Tras agregarse ese gen al material genético de las células de la médula, se reimplantarían las células.

El borrador da la relación de las cuestiones que deberá considerar el RAC antes de decidir si se acepta o no una propuesta de ensayo de esa terapia en sujetos humanos. La lista, larga, contiene numerosas cuestiones específicas acerca de la naturaleza y objetivos de los experimentos, métodos a seguir, bases teóricas y prácticas de éstos y medidas de seguridad que habrán de observarse.

No se eluden los aspectos éticos. "Preocupación principal del grupo", afirma Robert F. Murray, de la Universidad Howard, "es la protección del individuo frente a la lesión, el abuso o la explotación". El documento considera de gran importancia el consentimiento informado. Como en cualquier terapéutica nueva, resultará difícil, tanto para el médico como para el paciente, valorar los aspectos positivos y negativos de la administración del tratamiento.

Muchos de los que han elaborado esa relación juzgan de la mayor importancia asegurar la intimidad de los sujetos y de sus familias. Les preocupa también que las instituciones que intervengan en esos ensayos intenten aprovechar las nuevas técnicas con fines publicitarios. Destacan los miembros del comité que el borrador contiene cuestiones a considerar, no instrucciones a seguir; confían en emplear esas cuestiones como guión de partida para el desarrollo de un código formal a que atenerse. Se espera abrir a discusión pública las reglas que se vayan estableciendo.

Varios miembros del grupo de trabajo que ha elaborado el documento han afirmado que se trata de un intento de "contragolpe deliberado". No creen que la terapia genética de células somáticas presente peligros nuevos o exóticos. Su objetivo es crear un guión normativo amplio que quede "más allá de cualquier reproche". Afirma Samuel Gorovitz, de la Universidad de Maryland, miembro asimismo del comité: "Entiendo que la cuestión esencial es diseñar un procedimiento que genere la confianza del público... hasta los temores del público que nos parezcan irracionales e injustos son temores reales, y hay que darles respuesta".

El movimiento browniano

La observación del recorrido aleatorio de una partícula suspendida en un fluido condujo a la primera medición precisa de la masa del átomo. El movimiento browniano sirve de modelo matemático para los distintos procesos aleatorios

Bernard H. Lavenda

En determinadas ocasiones una gota de agua puede quedar atrapada en un fragmento de roca ígnea durante la solidificación de ésta. A principios del siglo XIX, el botánico escocés Robert Brown descubrió una gota de éstas en un trozo de cuarzo. El agua, pensó Brown, debía haber permanecido inaccesible durante siglos al polen y las esporas transportadas por el viento o la lluvia. Al enfocar dicha gota en un microscopio, observó trazas de minúsculas partículas suspendidas en la misma que oscilaban sin cesar con un movimiento completamente irregular. Este movimiento le resultaba familiar a Brown: había observado antes semejante tipo de oscilaciones en sus estudios de granos de polen en agua. El nuevo experimento, sin embargo, invalidaba la explicación que hasta entonces había propuesto: "la vitalidad se mantiene por [las "moléculas" de una planta] largo tiempo después de la muerte [de ésta]". Brown concluyó con razón que la agitación de las partículas atrapadas en el interior del cuarzo debía ser un fenómeno físico y no biológico, pero no pudo llegar a mayores precisiones.

La explicación del denominado movimiento browniano se encuentra hoy bien asentada. Un grano de polen o de polvo suspendido en un fluido se ve sometido al bombardeo continuo de las moléculas de éste. Una sola molécula difícilmente podría tener suficiente ímpetu para que su efecto sobre la partícula en suspensión lo recogiera el microscopio. Ahora bien, cuando muchas moléculas chocan con la partícula en la misma dirección, y simultáneamente, producen una deflexión observable de su trayectoria.

El movimiento browniano es, por consiguiente, un efecto doblemente aleatorio: la trayectoria de la partícula en suspensión deviene imprevisible en razón de las fluctuaciones arbitrarias de la velocidad de las moléculas circundantes. Por otro lado, como el microscopio es esencialmente un filtro que sólo pone de manifiesto los efectos de fluctuaciones de cierta magnitud en el entorno molecular local, el movimiento observado sólo insinúa la complejidad de la trayectoria real. Si el poder de resolución del microscopio se incrementara en un factor 10, 100 o 1000, se detectarían los efectos del bombardeo por grupos progresivamente menores de moléculas. A un mayor aumento, partes de la trayectoria de la partícula que inicialmente habían aparecido como rectas se observarían ahora dotadas de una estructura quebrada e irregular. La trayectoria de una partícula en el movimiento browniano fue uno de los primeros fenómenos naturales en los que se reconoció una auto-semejanza a cada grado de aumento, una propiedad clave de los objetos geométricos que Benoit B. Mandelbrot, del centro de investigación Thomas J. Watson de la IBM, ha denominado fractales.

Fenómenos probabilísticos

Desde principios de siglo, el estudio del movimiento browniano ha ejercido una poderosa influencia en física, química y matemática. En manos de Albert Einstein convirtióse en un método de observación concluyente para la confirmación de la teoría atómica de la materia. Einstein demostró, además, que la medición de ciertas propiedades del movimiento browniano de las partículas determinaban diversas constantes físicas de importancia: las masas de los átomos y las moléculas y el valor del número de Avogadro, que es el número de partículas elementales por mol, la unidad química estándar de cualquier sustancia. El movimiento browniano también ha contribuido a una comprensión teórica más honda de los principios de la termodinámica, formulados con anterioridad sobre lo que resultaron ser generalizaciones empíricas simplificadas en exceso.

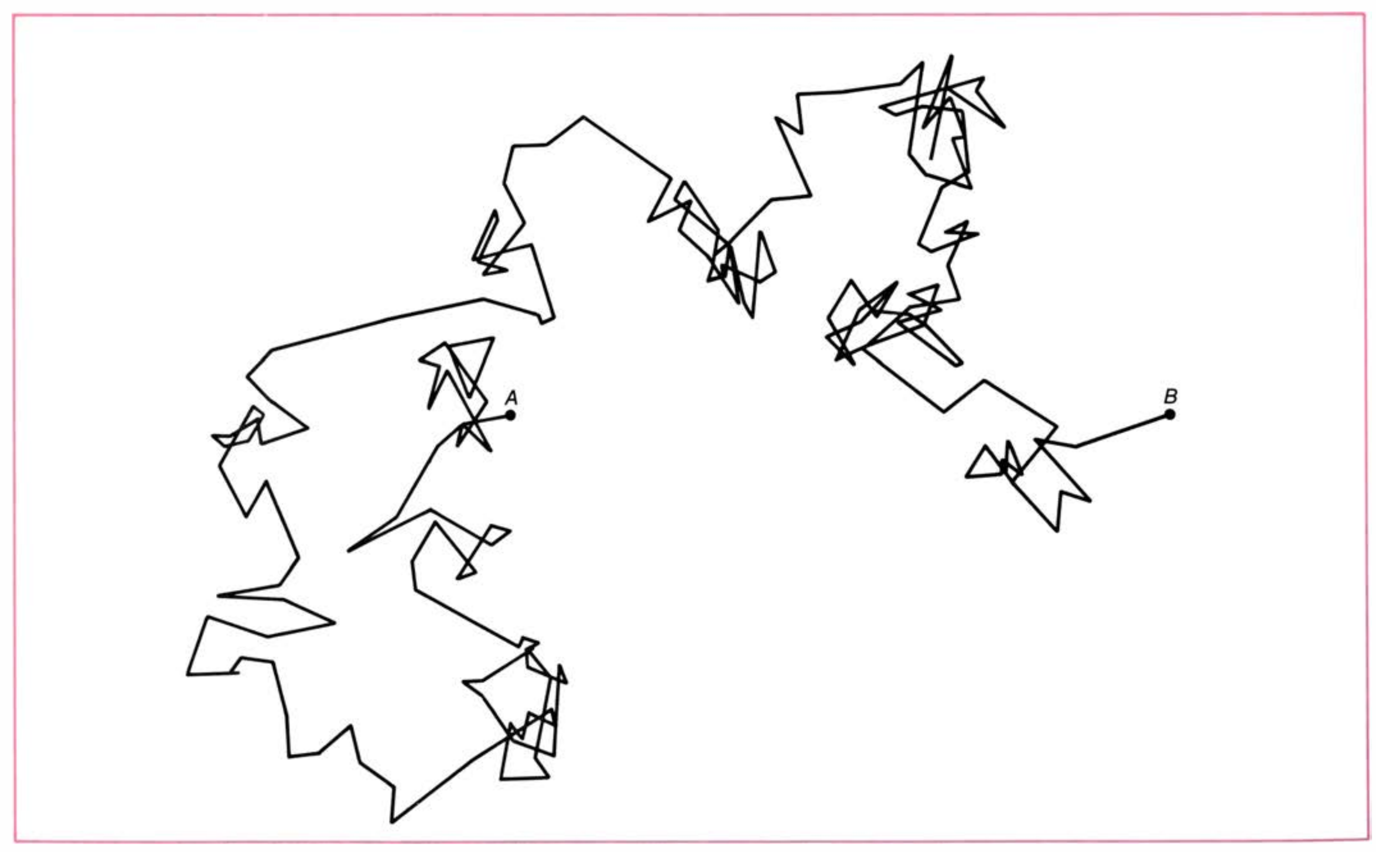
En fechas recientes, el estudio del movimiento browniano ha conducido a la invención de importantes técnicas matemáticas para la investigación general de procesos probabilísticos. Dichas técnicas se han aplicado al control del "ruido" electromagnético y han contribuido a la comprensión de la dinámica de la agregación estelar, la evolución de ecosistemas y el comportamiento de los precios de mercado.

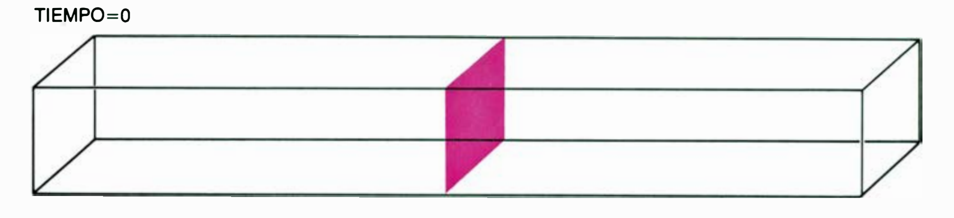
Por sorprendente que parezca, el movimiento browniano no despertó especial interés a lo largo del siglo XIX. Los científicos de entonces desecharon el fenómeno en la creencia de que se trataba de un simple efecto de corrientes térmicas locales debidas a diminutas diferencias de temperatura en el fluido. Si el movimiento lo causaran tales corrientes, las partículas próximas sufrirían el arrastre de la corriente local, y, por tanto, sería de esperar que tales partículas se movieran aproximadamente en la misma dirección. La observación mediante el microscopio contradice de plano semejante expectativa. Las partículas en suspensión no inciden unas en otras, ni siquiera cuando se hallan a distancias menores que sus diámetros respectivos.

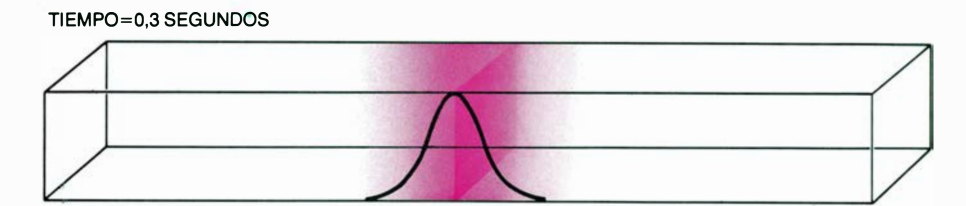
Hacia finales de siglo, diversos descubrimientos experimentales comenzaron a sacar a luz el origen molecular del movimiento browniano. Se sabía que cuanto menor era el tamaño de la partícula, más rápido se desarrollaba el movimiento browniano. Un aumento de la

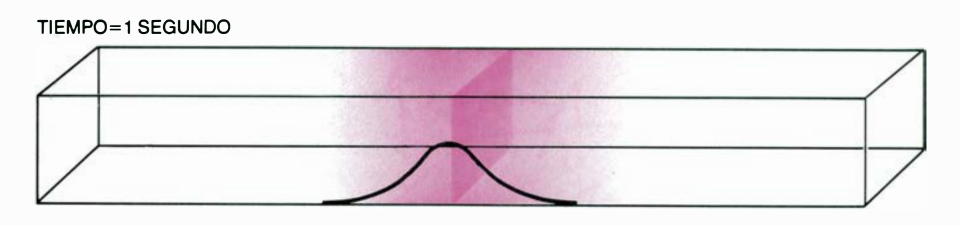
1. MOVIMIENTO ALEATORIO, BROWNIANO, de una partícula microscópica suspendida en agua. En la ilustración superior se muestra tal como fue representado en 1912 por Jean Baptiste Perrin. El diagrama de Perrin registra la posición de la partícula cada 30 segundos; tales diagramas, como él hizo observar, "sólo dan una idea muy pobre de la extraordinaria complejidad de la trayectoria real". Si se considerara con más detalle parte de la trayectoria y si la posición de la partícula se registrara con una frecuencia 100 veces mayor, pongamos por caso, se reproduciría la complejidad de la trayectoria inicial (*abajo*). El diagrama inferior se basa en una simulación numérica llevada a cabo por el autor.

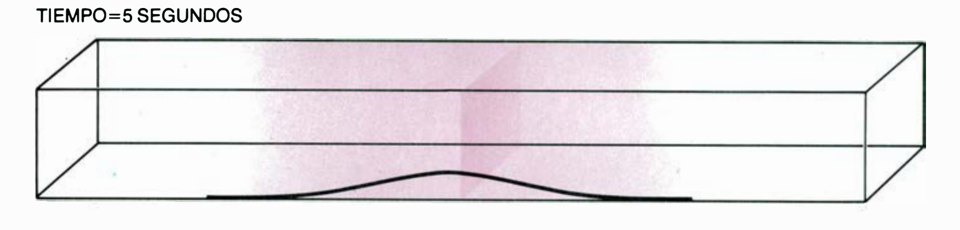
A B

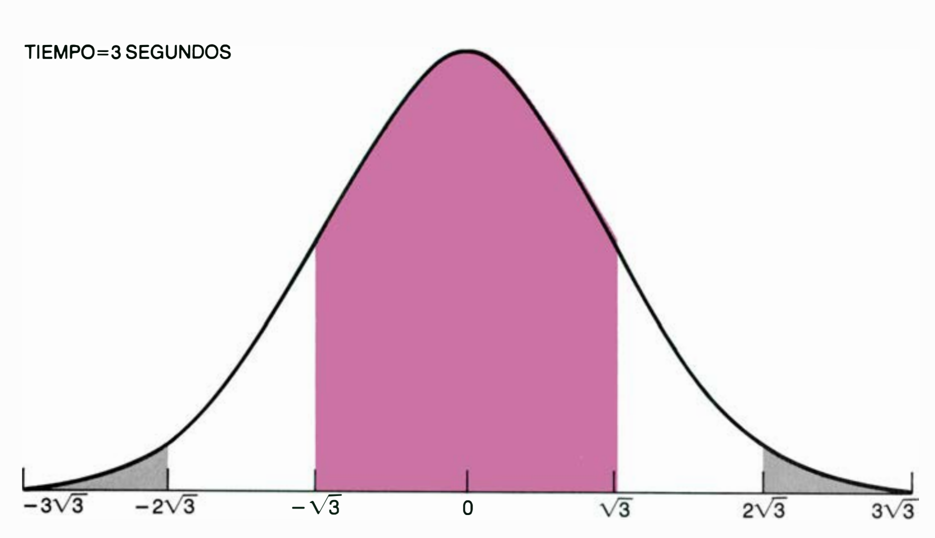












2. DIFUSION de partículas brownianas (*coloreadas*) en un líquido transparente o en un gas, mostrada en instantes sucesivos. Las partículas parten de una membrana permeable colocada en el centro de la caja. La curva acampanada correspondiente representa la densidad relativa de partículas en cada punto a lo largo de la dimensión horizontal de la caja. El desplazamiento cuadrático medio de una partícula al cabo de un tiempo dado es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido: se trata del desplazamiento más probable. La curva acampanada del pie de la ilustración muestra cómo se relaciona el desplazamiento cuadrático medio con la probabilidad de que una partícula ocupe cierta región de la caja al cabo de un tiempo. Por ejemplo, si el desplazamiento cuadrático medio al cabo de tres segundos es de $\sqrt{3}$ centímetros, la probabilidad de que una partícula se halle a menos de $\sqrt{3}$ centímetros de la membrana central es igual al área de la región coloreada comprendida bajo la curva, que viene a valer 0,68. La probabilidad de que se halle a más de $2\sqrt{3}$ centímetros de la membrana central es igual a la suma de las áreas de las dos regiones grises, que es menor que el 5 por ciento del área encerrada bajo la curva.

temperatura del fluido también parecía incrementar la agitación de dicho movimiento. Se reconoció que tales efectos eran coherentes con la teoría cinética de los gases, poco después de su elaboración por James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann en la década de 1870. Pero hubo que esperar hasta 1905 para que Einstein estableciera las primeras implicaciones cuantitativas de la teoría cinética en el movimiento browniano.

Teoría cinética

La teoría cinética de los gases constituyó el primer intento afortunado a la hora de explicar algunas propiedades conocidas de los gases, considerándolos efectos macroscópicos de átomos en movimiento. Se sabía desde las investigaciones de Robert Boyle en el siglo XVII que existía una relación inversa entre la presión y el volumen de un gas. Manteniendo constante la temperatura, si el volumen disminuye aumenta la presión en una cantidad inversamente proporcional. Si el volumen aumenta, la presión disminuye. Según la teoría cinética, la presión es el resultado de un bombardeo constante de las partículas contra las paredes del recipiente. La presión aumenta al disminuir el volumen porque la tasa de bombardeo de las partículas es mayor para un volumen pequeño que para otro grande.

Análogamente, existe una relación directa entre presión y temperatura. Si la temperatura de un gas aumenta sin que su volumen cambie, la presión aumenta proporcionalmente. Si baja la temperatura, remite la presión. La teoría cinética interpreta la temperatura como una medida de la energía cinética media de las partículas. Una mayor temperatura equivale a un aumento de la energía media de bombardeo, por lo que sube la presión del gas.

Para el gas llamado ideal, estas dos relaciones quedan resumidas en una ley sencilla. Dicha ley establece que, para un mol de un gas, el producto de la presión por el volumen del gas dividido por su temperatura absoluta es igual a una constante. Esta se denomina constante universal de los gases y se designa mediante la letra R, que vale 1,99 calorías por mol y por grado Celsius.

El progreso conceptual más importante de la teoría cinética fue la renuncia a cualquier pretensión de dar una descripción detallada de los distintos movimientos de las partículas. Ofrecía una descripción estadística del movimiento ocurrido, que resultaba plausible por el hecho de que un sistema constituido por muchas partículas tiene muy poca probabilidad de desviarse

significativamente de su comportamiento promedio. Por ello, la teoría cinética se denomina muchas veces mecánica estadística.

Einstein

Visto con perspectiva histórica, podría parecer intuitivamente obvio que una partícula de polvo o un grano de polen sumergido en el entorno turbulento atómico de un gas o un líquido experimentara un movimiento browniano. Sin embargo, para valorar la contribución de Einstein debe tenerse presente que la realidad física del átomo y sus constituyentes, que hoy en día se da totalmente por descontado, sólo gozaban de un estatuto provisional hace 80 años. El físico alemán Wilhelm Ostwald consideraba todavía los átomos "meras nociones hipotéticas que proporcionan una imagen muy conveniente" de la materia. Ernst Mach mantenía que todas las entidades teóricas, incluidos átomos y moléculas, debían ser tratados como ficciones útiles.

Einstein era un realista en esta cuestión. En 1905 escribía que el propósito original de sus investigaciones en teoría atómica "era hallar hechos que garanticen en lo posible la existencia de átomos de tamaño definido. Entre esos hechos", continuaba Einstein, "descubrí que, de acuerdo con la teoría atomística [es decir, la teoría cinética], debería haber un movimiento de las partículas suspendidas susceptible de contemplarse, ignorante de que las observaciones sobre el movimiento browniano eran ya habituales desde hacía largo tiempo". Einstein tuvo, pues, visión física para reconocer que los átomos revelarían su existencia en el movimiento de las partículas suspendidas en un fluido. Aunque desconocía el movimiento browniano, arguyó que la detección de tales partículas constituiría una potente confirmación de la teoría cinética. Entre las conclusiones de su trabajo hay una ecuación que posibilitó la medición precisa de la masa del átomo.

La investigación de Einstein sobre la teoría atómica del movimiento browniano se descompone en dos partes principales. La primera es matemática: se deduce una ecuación que describe la difusión de una partícula browniana en suspensión a través de un medio fluido. La segunda parte constituye un argumento físico y relaciona la tasa mensurable de la difusión de la partícula con otras magnitudes físicas, tales como el número de Avogadro y la constante universal de los gases.

Para expresar la difusión de una partícula en el lenguaje matemático de la mecánica clásica hay que conocer dos cosas de antemano: la velocidad inicial de la partícula y el valor y dirección de los impulsos que la partícula recibe en un instante dado. Como una partícula browniana experimenta unas 10^{21} colisiones por segundo, cualquier efecto que su velocidad inicial ejerza sobre el movimiento subsiguiente se perderá entre los efectos de las colisiones moleculares en un tiempo despreciable por brevísimo. Resulta inviable, asimismo, describir los impulsos uno a uno. De ahí que Einstein abandonara la descripción mecánica directa de la difusión de la partícula browniana e introdujera en su lugar una descripción probabilística.

Para deducir el resultado de Einstein nos servirá imaginar un pequeño volumen, de forma arbitraria, en la región accesible a las partículas difusoras. La tasa con que la concentración de estas partículas varía con el tiempo es igual al caudal entrante menos el caudal saliente de dicha región. Cada caudal depende del flujo de partículas, del caudal por unidad de área. El flujo de partículas entre dos puntos de un fluido es directamente proporcional a la diferencia de concentraciones de partículas en ambos puntos. El coeficiente de proporcionalidad se denomina coeficiente de difusión, o D; su valor se determina experimentalmente. La relación entre el flujo y la tasa de cambio de la concentración se conoce como ley de Fick.

La formulación matemática de esta situación física conduce a una ecuación diferencial denominada ecuación de difusión. Esta puede resolverse si se especifican las posiciones iniciales de la sustancia que se difunde y los límites del espacio accesible a la misma. La solución es una expresión matemática que da la concentración de sustancia en cada punto del espacio para cada instante. Verbigracia, si la sustancia difusora está inicialmente concentrada sobre la superficie de una membrana permeable que divide una caja en dos partes iguales, la solución de la ecuación de difusión será una familia de curvas acampanadas. El centro de cada curva coincidirá con el centro de la caja; a medida que transcurra el tiempo, la curva adquirirá una anchura mayor y una forma más achatada.

Desplazamiento de la partícula

Existe otra manera de interpretar las curvas acampanadas. Sea cada punto de la curva la densidad de probabilidad para la difusión de una sola partícula browniana a partir la membrana central de la caja. La elección del término metafórico de densidad de probabilidad resulta apropiado porque la densidad de una sustancia multiplicada por su volumen es igual a la masa de dicha sustancia. Análogamente, la densidad de probabilidad multiplicada por una medida apropiada da origen a una probabilidad. La medida apropiada para las curvas acampanadas es la longitud, no el volumen: se trata de la distancia entre dos puntos a lo largo del eje horizontal de la gráfica. El producto de dicha distancia por la altura media de la curva en el intervalo entre ambos puntos es una probabilidad.

El área encerrada bajo una de las curvas acampanadas entre las dos líneas verticales representa la probabilidad de que la partícula browniana se halle en una región dada de la caja en un determinado instante. Cada línea vertical pasa por uno de los dos puntos del eje horizontal que corresponden a los límites de la región considerada. Según esta interpretación, la solución de la ecuación de difusión no es una expresión de la distribución de concentraciones de partículas, sino una distribución de probabilidad.

Una medida probabilística conveniente para una partícula browniana es el desplazamiento cuadrático medio. Para entender qué significa dicha magnitud atendamos a la difusión de un gran número de partículas brownianas. Se miden los desplazamientos de todas las partículas en un cierto instante t; se elevan al cuadrado. La raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los desplazamientos constituye el desplazamiento cuadrático medio en el instante t. La probabilidad de que una partícula browniana se difunda como máximo una distancia igual al desplazamiento cuadrático medio a partir de la membrana central de la caja es 0,68; la probabilidad de que recorra más del doble de dicho desplazamiento cuadrático medio es menor de 0,05.

El desplazamiento cuadrático medio de una partícula browniana que se difunde a partir de la membrana de la caja es $\sqrt{2Dt}$, donde D simboliza el coeficiente de difusión y t designa el tiempo. Así pues, si una partícula se difunde, en promedio, un centímetro en un segundo, se necesitarán cuatro segundos para difundirse dos centímetros y nueve segundos para difundirse tres centímetros. Otras condiciones iniciales diferentes en la ecuación diferencial para la difusión dan origen a soluciones semejantes. Einstein llegó a predecir que el desplazamiento radial de una partícula que se difunda en cualquier dirección a partir de un punto central "no era proporcional al tiempo sino a la raíz cuadrada del tiempo". Este resul-

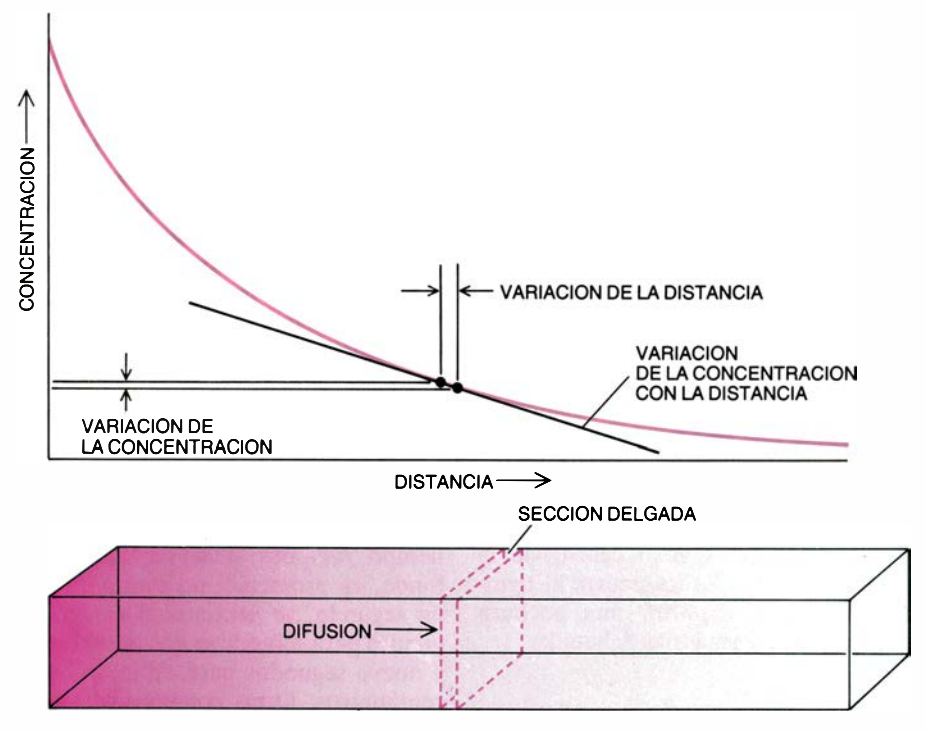
tado se sigue", afirmaba, "de los caminos recorridos durante dos intervalos consecutivos de tiempo, que no siempre deben sumarse, sino que con casi igual frecuencia se deben restar".

Medidas de difusión

Gracias a esta predicción llegó la primera comprobación adecuada de la expresión de Einstein para la distribución de probabilidades de los desplazamientos de una partícula browniana. El físico francés Jean Perrin y sus colaboradores siguieron el movimiento de una partícula browniana casi esférica y registraron su posición a intervalos iguales de tiempo. Tras repetir el experimento muchas veces, representaron el promedio del cuadrado del desplazamiento en función del tiempo. La gráfica así obtenida era una línea recta, cuya pendiente se deslizaba proporcional a D, el coeficiente de difusión.

El valor experimental de D es una de las nuevas magnitudes introducidas en la teoría de Einstein que permite medir el tamaño del átomo. Imaginemos que se han suspendido gránulos microscópicos o partículas brownianas en una columna vertical de aire en reposo [*véase la figura 4*]. Como los gránulos están sometidos a la fuerza de la gravedad, tienden a caer hacia el fondo de la columna. Sin embargo, a medida que su concentración cerca del fondo va aumentando, la diferencia de concentración entre éste y la superficie tiende a llevar los gránulos hacia esta última, donde su concentración es relativamente menor. Cuando se establece el equilibrio, la distribución de gránulos refleja un equilibrio entre el impulso hacia abajo de la gravedad y el impulso ascendente de la difusión.

La viscosidad del aire impide que los gránulos reciban una aceleración continua por parte de la gravedad. Adquieren una cierta velocidad terminal y se desplazan luego hacia abajo con esta velocidad constante, que es igual a la fuerza de la gravedad sobre cada partícula dividida por la viscosidad. Como ésta cambia con el aumento de densidad del aire, la velocidad terminal varía con la altura, pero dicha complicación puede eliminarse si se consideran sólo las velocidades de las partículas a cierta altura, determinada de manera arbitraria. En el equilibrio, el número de gránulos que pasan hacia abajo a este nivel debe compensarse con el número de partículas que lo atraviesan en sentido ascendente. Por tanto, a una altura dada la velocidad media de un gránulo que se mueva hacia arriba debe ser igual a la velocidad terminal de los gránulos descendentes.



3. UNA CONCENTRACION NO UNIFORME de partículas brownianas en una caja (*en color*) da lugar a una fuerza de difusión que impulsa las partículas hacia zonas de menor concentración. Arriba: concentración de partículas en un instante dado en función de la posición. La tasa de cambio de la concentración entre dos puntos de la caja viene determinada por la pendiente de la recta que une los puntos de la gráfica correspondientes a ambos puntos de la caja. El flujo medio de partículas a través de una sección de la caja es proporcional a la tasa de variación de la concentración de partículas con la distancia; es, pues, el flujo proporcional a la pendiente de la recta que une los dos puntos de la curva de concentraciones correspondientes a los límites de la sección considerada. El flujo es igual a la concentración media de las partículas en el interior de la fina sección recortada en el centro, multiplicada por su velocidad media.

El flujo de los gránulos que se difunden es igual a su velocidad media dividida por el volumen de la pequeña nube que atraviesa el nivel considerado de la columna en un breve intervalo. Así pues, el flujo equivale al producto de la velocidad de los gránulos por su concentración C al nivel considerado. Y por ser el flujo también igual al producto de D, el coeficiente de difusión, por la tasa de variación de la concentración de gránulos con la altura, la velocidad media con que los gránulos se difunden hacia arriba equivaldrá a D/C multiplicado por la tasa de cambio de concentración con la altura.

Masa del átomo

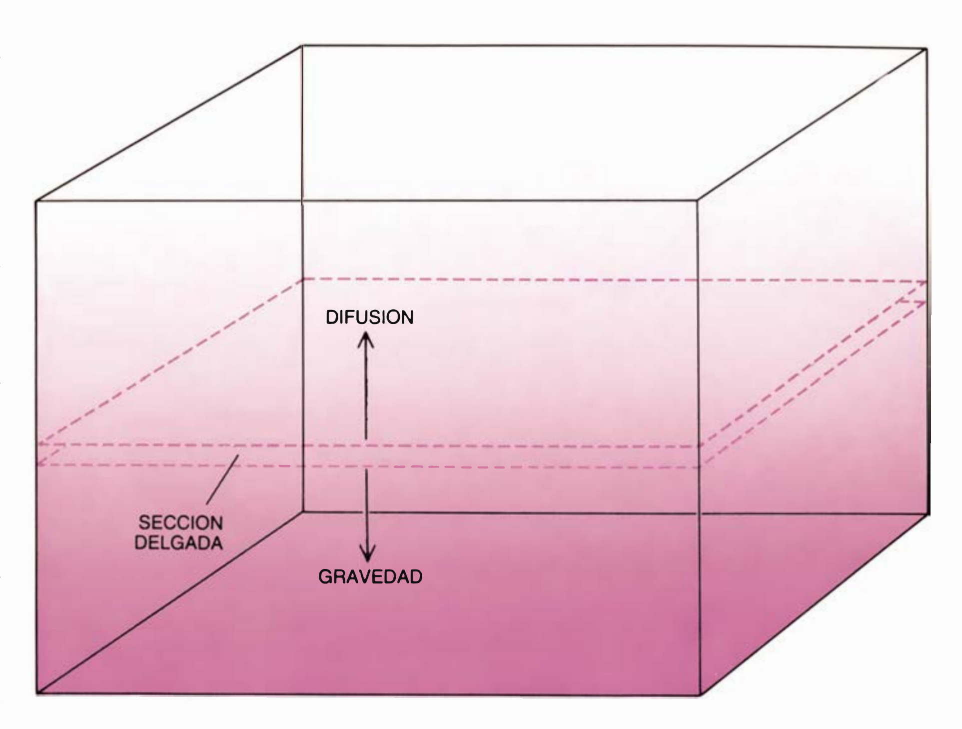
La tasa de cambio de la concentración es proporcional a la tasa de variación de la presión de los gránulos con la altura; la constante de proporcionalidad se deduce de la ley de los gases ideales: ésta resulta ser igual a N_o/RT, donde N_o representa el número de Avogadro, R la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta del gas. La aparición en este punto del número de Avogadro se sigue de la propia ley de los gases ideales, pero cuando Einstein propuso este argumento se conocía dicha magnitud experimentalmente y con mucha imprecisión. Su introducción en este contexto permitió relacionar dos propiedades de los fluidos que hasta entonces habían parecido independientes: el movimiento de una partícula en el seno de un fluido viscoso y la denominada presión osmótica que ejerce una sustancia disuelta confinada por una fuerza exterior en una pequeña región de un fluido.

La tasa de variación de la presión con la altura en una posición determinada se expresa a través de la concentración de gránulos en una fina capa por encima mismo de la posición considerada multiplicada por la fuerza que la gravedad ejerce sobre cada gránulo. Al igualar la velocidad de difusión de un gránulo con la velocidad terminal de éste bajo la acción de la gravedad, una sencilla manipulación algebraica da la ecuación de Einstein para el coeficiente de difusión: $D = RT/fN_o$, donde f representa la viscosidad del aire. En virtud de esa expresión, el valor del número de Avogadro es RT/Df; vale decir: el producto de la constante universal de los gases por la temperatura absoluta, dividido por el coeficiente de difusión y la viscosidad.

La determinación del valor del número de Avogadro equivale a la medida de las dimensiones atómicas. En este sentido explotó Perrin el resultado

de Einstein, por cuya razón se le atribuyó el mérito de ser el primero que pesó el átomo. La viscosidad f puede medirse de varias maneras; una de ellas, a partir de la velocidad con que una partícula se sedimenta en el seno de un fluido. La constante universal de los gases R se determina a partir de la temperatura y la presión de una cantidad conocida de gas confinada en un volumen considerado. Puesto que Perrin había ya medido D, y T viene dada por un termómetro, cabe calcular el número de Avogadro, cuyo valor se aproxima a 6×10^{23}.

Ante las múltiples hipótesis imaginadas por Einstein, llama la atención que el valor de Perrin para el número de Avogadro sólo difiera en un 19 por ciento de su valor aceptado hoy en día. El valor del número de Avogadro conduce directamente a la masa del átomo y la molécula. Por definición, la masa de una partícula elemental es la masa de un mol de la sustancia compuesta por dichas partículas, dividida por el número de Avogadro. Por ejemplo, un mol de oxígeno pesa 16 gramos. El peso de una molécula de oxígeno es por consiguiente $16/(6 \times 10^{23})$, o sea $2{,}7 \times 10^{-23}$ gramos. El puntilloso esfuerzo que condujo a este cálculo y a otros similares fue el golpe de gracia para los que aún permanecían escépticos con respecto a la teoría atómica. Perrin obtuvo el premio Nobel de física en 1926.



4. DISTRIBUCION DE EQUILIBRIO de partículas brownianas en un campo gravitatorio que resulta de un balance dinámico entre la gravedad y la fuerza de difusión, que impulsa las partículas desde las zonas de mayor concentración del fondo de la columna hasta las de menor concentración de la parte superior. En cualquier sección transversal de la columna, la velocidad media descendente de las partículas debida a la gravedad iguala la velocidad media ascendente con que se difunden las partículas. La velocidad ascendente es proporcional a la variación de la concentración de partículas con la altura (*véase la figura 3*). Si se supone que las partículas forman un gas ideal, resulta entonces fácil deducir una expresión algebraica para el peso de un átomo o de una molécula en función de magnitudes mensurables experimentalmente.

Termodinámica

Lo que he dicho hasta ahora sobre la teoría de Einstein del movimiento browniano no le hace aún justicia. No sólo verificó la existencia física de los átomos, sino que, además, su éxito espectacular estableció la mecánica estadística como la base sobre la cual deben hallar soporte o refutación las leyes de la termodinámica.

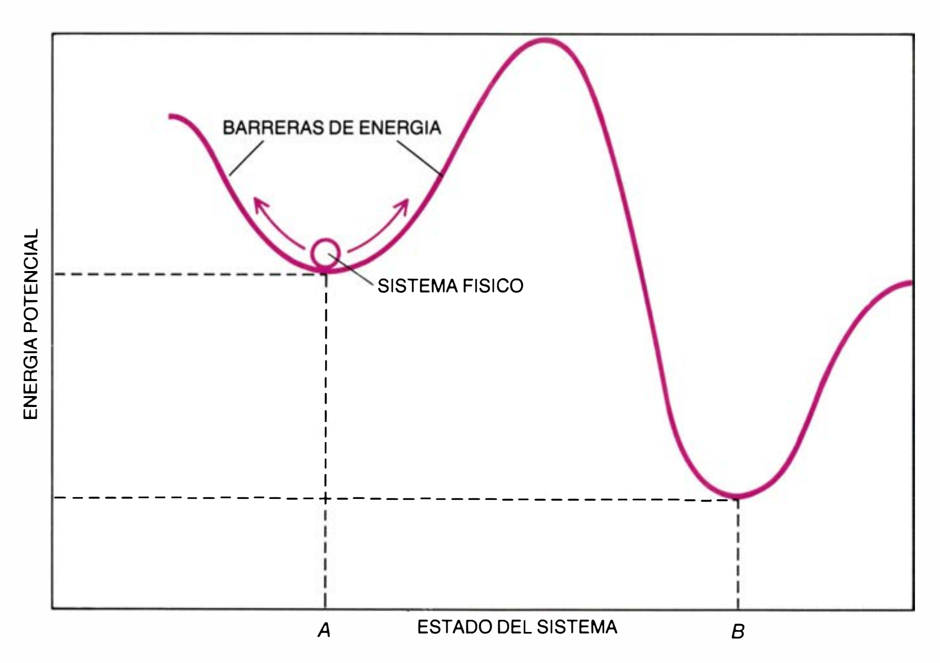
Dado el valor del número de Avogadro y lo diminuto del átomo, se explica por qué fue posible establecer leyes termodinámicas fenomenológicas, o macroscópicas, aproximadamente correctas antes incluso del desarrollo de la mecánica estadística. Según la ley de los grandes números, las fluctuaciones o desviaciones espectaculares del comportamiento medio han de constituir la excepción en un sistema macroscópico de 10^{23} partículas. Otras fluctuaciones, menores y más comunes, predichas para tales sistemas se hurtaban a los instrumentos de medida poco sensibles del siglo XIX. Sin embargo, la visión estadística de la termodinámica exigió la revisión de sus leyes fenomenológicas.

Por ejemplo, el movimiento perpetuo de una partícula en el movimiento browniano contradice la versión fenomenológica primitiva de la segunda ley de la termodinámica. Según el enunciado fenomenológico de la segunda ley, en un sistema cerrado la temperatura de todos los puntos tiende al mismo valor; cuando se alcanza el equilibrio, no hay manera de transformar la energía térmica en energía útil, o trabajo, en dicho sistema.

Ahora bien, la temperatura de una partícula browniana suspendida en agua es la misma que la del agua, pero la energía cinética de su constante agitación ha de provenir de la energía cinética de las moléculas del agua. Como la temperatura es una forma de expresar la energía cinética translacional de las moléculas, la breve transferencia de energía cinética a la partícula browniana sólo puede conseguirse con un enfriamiento local del agua. Así pues, el movimiento browniano muestra que el estado de temperatura completamente uniforme que presupone la segunda ley no se satisface nunca de un modo cabal en la naturaleza. La definición de equilibrio termodinámico ha de tener en cuenta fluctuaciones aleatorias, pequeñas aunque persistentes, en la temperatura del sistema.

De la importancia de dichas fluctuaciones en los sistemas físicos habló ya Einstein en 1910. A este respecto desarrolló una teoría de las fluctuaciones mediante la introducción de conceptos estadísticos en la termodinámica. La termodinámica fenomenológica se limitaba a codificar las repetidas observaciones experimentales según las cuales la energía siempre se degrada, en el sentido de que cada vez cuesta más extraerla para efectuar un trabajo útil. En la termodinámica fenomenológica, la medida de esta degradación de la energía fue denominada entropía, de la raíz griega que significa cambio. Según el enunciado fenomenológico de la segunda ley, la entropía de un sistema aislado siempre tiende hacia un máximo con el transcurso del tiempo.

En termodinámica estadística, la definición de entropía recibe una modificación sutil. Según la teoría atómica, todos los macroestados de un sistema, o estados observables macroscópicamente, incluido el equilibrio, manifiestan las diversas configuraciones de átomos y moléculas. Dichas configuraciones se denominan microestados. En todo sistema aislado, cada microestado compatible con un macroestado dado es igualmente probable. De donde resulta razonable suponer que el estado de equilibrio identificado por la segunda ley en su versión fenomenológica es el macroestado para el cual existe un mayor número de microestados.



5. DIAGRAMA DE ENERGIA para un sistema físico con dos estados, *A* y *B*, cuya energía potencial es mínima con respecto a los estados de sus distintos entornos. En ausencia de fluctuaciones térmicas, si el sistema ocupara uno de estos estados, *A* o *B*, permanecería indefinidamente en él. En presencia de fluctuaciones aleatorias, sin embargo, acontece una probabilidad finita de que el sistema no permanezca en ninguno de dichos estados con un mínimo local de energía. Un sistema en un estado *A* puede atravesar la barrera de energía y llegar al estado *B* y un sistema en el estado *B* puede alcanzar el *A*. La estabilidad relativa de ambos estados *A* y *B* se infiere de las probabilidades respectivas de ambas transiciones.

Hay muchísimos más microestados esencialmente indistinguibles y asociados con un macroestado desordenado que microestados asociados a otro ordenado. Por tanto, si en termodinámica estadística el estado de equilibrio había de seguir siendo el de máxima entropía, debíase redefinir la entropía: sería la medida del desorden de un sistema físico, no la medida de la degradación de su energía. Cuanto mayor es el desorden del sistema, más microestados se hacen compatibles con el macroestado correspondiente y mayor es la entropía del macroestado.

La relación precisa entre la entropía de un macroestado y el número de microestados asociados fue formulada por Boltzmann en 1896. La entropía es proporcional al logaritmo del número de microestados; la constante de proporcionalidad, denominada constante de Boltzmann, es la constante universal de los gases R por átomo, que equivale, pues, a $3{,}3 \times 10^{-24}$ calorías por grado Celsius.

El cambio clave estriba en que, en termodinámica estadística, la segunda ley no puede tomarse ya como una verdad absoluta. Por ser igualmente probables todos los microestados del sistema, hay probabilidad, pequeña, aunque no nula, de fluctuaciones que lleven a un macroestado muy ordenado. Dicho de forma más precisa, la probabilidad de que una fluctuación espontánea produzca una disminución de entropía es proporcional a e, la base de los logaritmos naturales, elevada a un exponente igual a dicha variación de entropía cambiada de signo y dividida por la constante de Boltzmann. Por ejemplo, la probabilidad de un descenso espontáneo de entropía de un mol de helio a cero grados Celsius es del orden de 10^{-19}. Es posible, aunque extraordinariamente improbable, que todas las moléculas de aire de una habitación se congreguen de forma espontánea en un rincón, dejando el vacío en el resto de la habitación.

La validez de la termodinámica fenomenológica refleja, pues, el hecho siguiente: con respecto a los patrones ordinarios, la constante de Boltzmann es un número extraordinariamente pequeño. ¿Podríamos sobrevivir en un mundo donde la constante de Boltzmann alcanzara un valor superior, de lejos, a la cifra actual? Probablemente no. En ese mundo el incremento de energía cinética de cada átomo para un aumento dado de temperatura sería mucho mayor que en nuestro universo. Crecería la probabilidad de fluctuaciones que disminuyeran la entropía; la aparición espontánea de sistemas físicos ordenados sería, también, mucho más frecuente a escala macroscópica.

Tal mundo sería semejante al que experimentaríamos si pudiéramos reducirnos a las dimensiones de una partícula browniana. A dicha escala, la temperatura, la presión y el volumen de la materia circundante fluctúan incesantemente. Por si esto fuera poco, en las proximidades de un punto crítico de una transición de fase, verbigracia, la correspondiente al paso de vapor a líquido, las fluctuaciones aleatorias crecen de un modo espectacular. Para expresar la interpretación probabilística de las leyes de la termodinámica fenomenológica, María Goeppert-Mayer y Joseph Edward Mayer tomaron esta frase de Gilbert y Sullivan: "¿Nunca? No, ¡nunca! ¿Nunca? Bueno, casi nunca".

Termodinámica fuera de equilibrio

La constatación de que el movimiento browniano es una manifestación de las fluctuaciones estadísticas entre los microestados de un sistema termodinámico tuvo para el estudio de los sistemas fuera de equilibrio consecuencias de mayor alcance que para el de los sistemas que se mantenían dentro. En el equilibrio, el orden con que los sucesos se producen es irrelevante: las fluctuaciones entre microestados difícilmente dan lugar a un macroestado observable. Para sistemas fuera de equilibrio, sin embargo, el orden temporal de los acontecimientos resulta de suma importancia.

Ya he comentado que una versión estadística de la segunda ley de la termodinámica fenomenológica debe explicar cómo evolucionan los sistemas hasta el estado de equilibrio. En otras palabras, la segunda ley debe explicar por qué razón los macroestados ordenados originan espontáneamente macroestados desordenados. Batir un huevo y otros procesos afines son irreversibles en el tiempo; determinan por tanto una dirección temporal. En la termodinámica fenomenológica se ha desarrollado un conjunto de leyes a partir de estudios empíricos que describen la evolución de diversos procesos irreversibles desde ciertos estados especiales de no equilibrio.

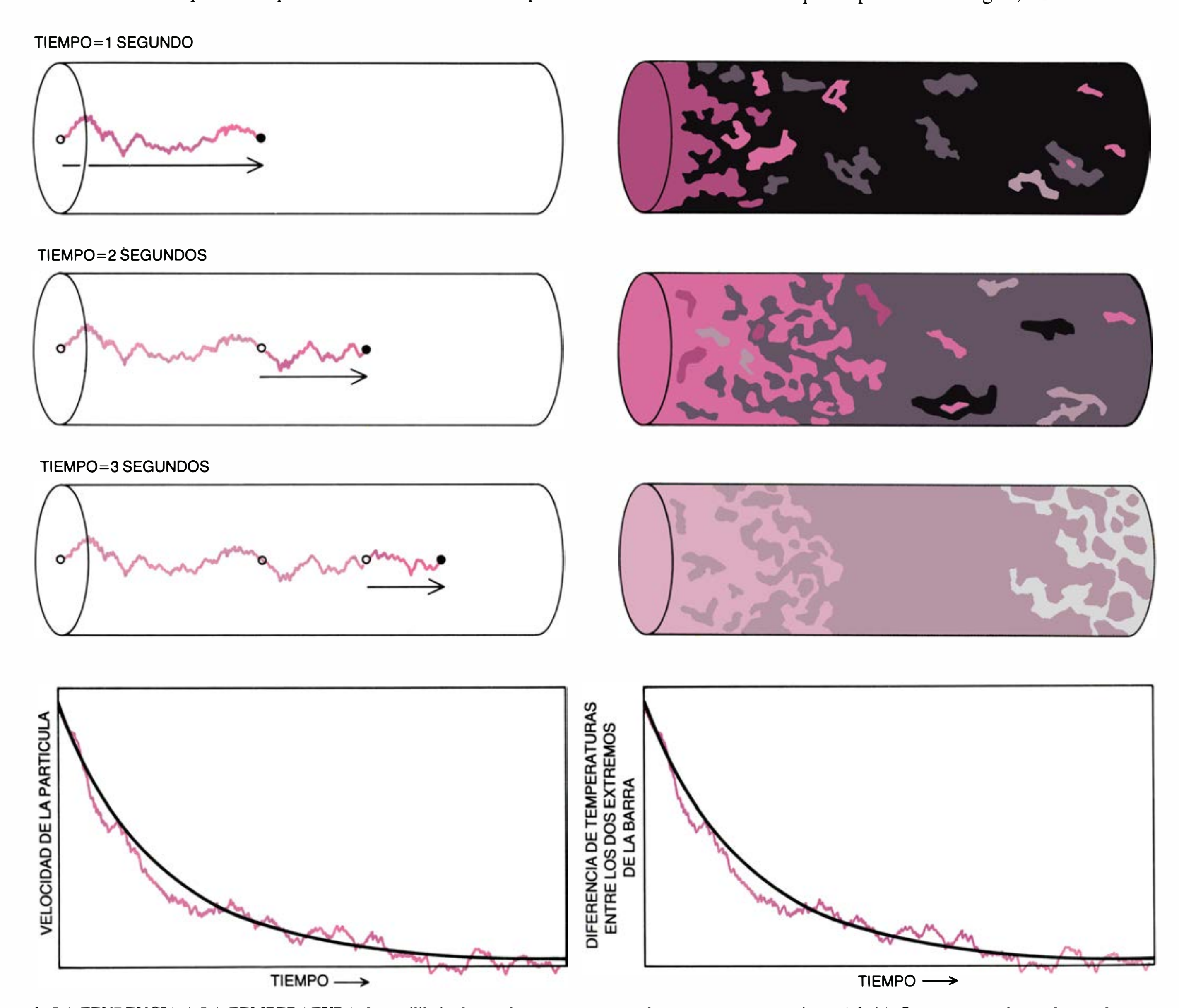
Por ejemplo, si una barra metálica se calienta por un extremo y la diferencia de temperaturas entre sus dos extremos no es demasiado elevada, la tasa con que la energía calorífica tiende a fluir desde el extremo caliente hasta el frío es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas. Así pues, a medida que la barra se aproxima al equilibrio térmico, la "fuerza" debida a la diferencia de temperaturas disminuye y decrece el "flujo" o tasa de transferencia de calor. Análogamente, según se vio antes, la ley de Fick establece que el flujo de un gas que se difunde desde regiones de gran concentración hacia otras de baja concentración es directamente proporcional a la

"fuerza" descrita por la diferencia de concentraciones entre ambas regiones. Una y otra ley son relaciones lineales, porque el flujo es siempre proporcional a la fuerza, a pesar de que se hallen en cambio incesante.

En principio, la termodinámica de no equilibrio no está restringida a relaciones lineales entre flujos y fuerzas. Cuanto más se aleja un sistema del equilibrio, mayor interés adquieren los efectos no lineales. No existe un método general de formular leyes que describan tales efectos, sólo hay aproximaciones por ensayos sucesivos. Sin embargo, la comprensión estadística de sistemas de no equilibrio que obedezcan leyes fenomenológicas lineales puede llevar a un mejor conocimiento de los efectos no lineales. El tratamiento matemático de la termodinámica de no equilibrio puede retrotraerse a una ecuación que el físico francés Paul Langevin formuló en 1908 para la descripción del movimiento de una partícula en un fluido viscoso.

Imaginemos que una pequeña partícula esférica, del tamaño de una canica, por ejemplo, es impulsada a través de un fluido por alguna fuerza exterior. Recuérdese que la partícula acaba por alcanzar una velocidad terminal que depende de la viscosidad del fluido. La viscosidad opone una fuerza de resistencia, proporcional a la velocidad de la partícula, que actúa en la misma dirección y sentido opuesto que dicha velocidad; tiende, pues, a frenarla. La energía del movimiento hacia adelante se disipa en forma de calor, que desencadena fluctuaciones térmicas en el fluido.

Supongamos ahora que el tamaño de la partícula es variable y que lo vamos reduciendo continuamente hasta dimensiones microscópicas. Una partícula de tamaño macroscópico sólo "notaría" la fuerza de resistencia, y su movimiento no sería afectado esencialmente por el bombardeo molecular. A medida que la partícula mengua, las fluctuacio-



6. LA TENDENCIA A LA TEMPERATURA de equilibrio de una barra calentada por un extremo (*serie esquemática de la derecha*) es matemáticamente análoga al movimiento de un grano de arena en un líquido (*esquemas de la izquierda*). La fuerza de resistencia que se ejerce sobre el grano por parte de la viscosidad del líquido es análoga a la "fuerza" que tiende a restablecer una temperatura uniforme en la barra calentada. La fuerza de resistencia es proporcional a la velocidad del grano, por lo cual va disminuyendo a medida que el grano se detiene. Análogamente, la fuerza que tiende a restablecer el equilibrio en la barra calentada es proporcional a la diferencia de temperaturas que se registra entre sus dos extremos; a medida que dicha diferencia disminuye, la fuerza restauradora se reduce. Ambos procesos se representan gráficamente en las curvas negras continuas (*abajo*). Superpuesta sobre cada uno de estos procesos, hay una rápida fuerza fluctuante debida a la agitación molecular aleatoria. La fuerza fluctuante que actúa sobre el grano hace que éste describa un movimiento browniano alrededor de la trayectoria rectilínea en el seno del líquido. En la barra, las fuerzas fluctuantes presentan la forma de fluctuaciones de temperatura en pequeñas regiones; las regiones relativamente más calientes se han coloreado; y las regiones más frías se indican mediante una gradación descendente de la intensidad del color y tonalidades grises cada vez más oscuras. Las fluctuaciones se representan mediante líneas quebradas de color que oscilan en torno a las curvas negras suaves; dichas fluctuaciones se han exagerado en los diagramas para poder ofrecer mayor claridad.

nes se hacen cada vez más ostensibles hasta que la partícula termina por comportarse como si no le afectara la fuerza macroscópica de resistencia; presenta entonces movimiento browniano. La ecuación de Langevin combina ambos efectos y los aplica a partículas de tamaño intermedio.

Ecuación de Langevin

La ecuación de Langevin se ve así enraizada en dos mundos: el macroscópico, representado por la fuerza de resistencia, y el mundo microscópico, manifestado por la fuerza fluctuante o browniana. Según dicha ecuación, la fuerza total que actúa sobre una partícula es la suma de ambas fuerzas, que pueden interpretarse como las componentes de la fuerza total en escalas temporales diferentes. En tiempos cortos, la fuerza que domina es la fluctuante; ésta varía con rapidez. En intervalos más largos, empiezan a predominar los efectos de la fuerza de resistencia. La fuerza total equivale a la masa de la partícula multiplicada por la aceleración producida por ambas componentes, que es la tasa de cambio de la velocidad de la partícula con el tiempo.

El físico noruego Lars Onsager observó agudamente que, con un simple cambio de notación, la ecuación de Langevin podía suministrar una descripción estadística de los procesos irreversibles. Así, sugirió sustituir la velocidad de la partícula descrita por la ecuación de Langevin por la desviación de una magnitud termodinámica con respecto a su valor de equilibrio. Por ejemplo, si una barra se calienta por un extremo, su desviación del equilibrio se asimila a la velocidad de una partícula. Además, Onsager propuso remplazar la fuerza de resistencia sobre la partícula por la tendencia del sistema termodinámico hacia su estado de equilibrio. Así pues, la "fuerza" termodinámica que lleva la barra desigualmente calentada hacia el equilibrio se compara con la resistencia viscosa que frena la partícula en movimiento. La ecuación resultante sirve entonces para estudiar la influencia de las fluctuaciones térmicas sobre los procesos irreversibles.

El truco matemático de Onsager pone de manifiesto una profunda analogía entre el movimiento de la partícula y el relajamiento de un estado de no equilibrio. En intervalos temporales largos, comparados con el tiempo de relajación de una fluctuación, Onsager supuso que, en promedio, el proceso de decaimiento venía dado por las leyes fenomenológicas de la termodinámica de no equilibrio. La aparición de un flujo de calor de variación suave, desde el extremo caliente al extremo frío de la barra, resulta muy parecida a la aparición de una fuerza de resistencia media en una partícula relativamente grande que se desplazara en un líquido. En cada caso, las observaciones se llevan a cabo en intervalos cortos, finitos; si bien se prolongan lo suficiente como para que las fluctuaciones aleatorias se cancelen entre sí. Sólo en intervalos cortos se detectan las fluctuaciones erráticas superpuestas sobre el flujo medio y suave que se observa.

La hipótesis de Onsager sobre la evolución promedio de un sistema hacia el equilibrio parece razonable. ¿Cómo, si no, iban a emerger las relaciones lineales de la termodinámica de no equilibrio? ¿Hay acaso una descripción estadística mejor? A pesar de lo cual peca de restrictiva, pues limita su teoría al estudio de sistemas cuyas fluctuaciones quedan descritas mediante una campana de Gauss. En otras palabras, las pequeñas fluctuaciones de temperatura de la barra con respecto a los valores medios dados por las leyes fenomenológicas del transporte de calor han de distribuirse de la misma manera que los desplazamientos de un gran número de partículas brownianas con respecto a un punto y en un instante determinados.

Inversión temporal y evolución

¿Qué ocurre si la distribución de las fluctuaciones no se supone acampanada o gaussiana? Se puede partir entonces de otra hipótesis razonable y menos restrictiva: cualquier estado de no equilibrio de un sistema físico ha de tender hacia un estado de equilibrio caracterizado por la anulación de los flujos. Según esta condición, no es imprescindible que el estado de equilibrio se mantenga estable en el sentido estático habitual. Antes bien, el estado de equilibrio es aquel hacia el que tienden todos los demás estados. Si se perturba el sistema fuera de equilibrio, éste responde disminuyendo la magnitud de la perturbación, para así restablecerse el estado inicial de equilibrio.

Esta definición de equilibrio reconoce que las fluctuaciones térmicas, por minúsculas que sean, alteran la evolución de un sistema termodinámico. Siempre habrá alguna probabilidad no nula de que el sistema evolucione contra corriente. Por muy lejos del equilibrio que se halle cierto estado y por pequeñas que sean las fluctuaciones aleatorias, existe siempre una cierta probabilidad no nula de que más tarde o más temperano el sistema alcance dicho estado a partir del equilibrio.

Un análisis matemático detallado da un resultado todavía más notable. Sucede que en su aproximación a ese estado de no equilibrio, altamente improbable, el sistema tiende a seguir justamente el inverso del camino que seguiría si, a partir de dicho estado, se aproximara al de equilibrio, suponiendo que no haya interferencias exteriores al sistema. Esta evolución antitermodinámica, descrita por la inversión temporal, no es lenta y continua, sino que se desarrolla con brusquedad y a saltos. En un tiempo virtualmente ilimitado, el crecimiento y decaimiento de las fluctuaciones térmicas manifiestan una si-

7. SIMETRIA ENTRE PASADO Y FUTURO, esquematizada mediante el recorrido temporal de un sistema a lo largo de una serie de estados físicos. Cada punto del interior de la región gris representa un estado del sistema. El estado de equilibrio es el punto *0*. Si se desplaza el sistema hasta cierto estado de no equilibrio *U*, correspondiente al máximo de entropía del sistema sobre la frontera, éste evolucionará casi con toda seguridad según las leyes macroscópicas de la termodinámica. Dichas leyes predicen que pasará por algún estado de no equilibrio *S*, de entropía no menor que la de *U*, y que llegará, por último, hasta las proximidades de *0* (*en color*). Una vez allí, el sistema fluctuará sin cesar alrededor de *0*. Por muy pequeñas que sean las fluctuaciones, es posible que su efecto acumulativo conduzca el sistema de nuevo al punto *U* de la frontera. Si no se interviene sobre el sistema, la última parte del recorrido desde *S* hasta *U* seguirá casi siempre un camino infinitesimalmente próximo al que antes había recorrido desde *U* hasta *S*.

metría entre pasado y futuro opuesta a la asimetría temporal asociada más comúnmente a la termodinámica mediante la segunda ley.

Analogías matemáticas

El aparato matemático desarrollado para abordar las fluctuaciones reflejadas en el movimiento browniano puede aplicarse, en líneas generales, a cualquier disciplina en que se pretenda evaluar los efectos de una variable aleatoria. Estas magnitudes suelen presentarse en la descripción de muchos fenómenos naturales; por una razón principal: los valores de sus variables no se conocen o son difíciles de determinar. Una de las primeras aplicaciones fue el filtrado del ruido electromagnético, aleatorio y estático, de las señales de radar o de emisoras de radio. Por analogía, muchas técnicas matemáticas semejantes resultan útiles cuando puede identificarse algún tipo de "ruido" en un sistema cuya evolución pueda determinarse en ausencia de dicho ruido. El problema consiste en este caso en evaluar la influencia de la variable aleatoria sobre el resultado final.

Por ejemplo, en el estudio de la dinámica de cúmulos estelares, la fuerza sobre una estrella puede desglosarse en dos componentes: la influencia gravitatoria global del cúmulo, considerado como un todo, y la influencia gravitatoria del entorno estelar. La influencia global del cúmulo varía lentamente con el tiempo y con la posición de la estrella; puede aproximarse mediante una expresión sencilla para la energía potencial gravitatoria, ya que el número de estrellas que engendran dicha fuerza es muy grande.

La influencia de la distribución de materia en el entorno estelar introduce fluctuaciones de variación muy rápida en el potencial gravitatorio de la estrella considerada. Tales fluctuaciones determinan que la fuerza que actúa sobre la estrella difiera de la fuerza que resultaría de tener en cuenta tan sólo el potencial gravitatorio global del cúmulo. Un estudio llevado a cabo a principios de la década de los 40 por Subrahmanyan Chandrasekhar permite calcular la probabilidad de que el valor de la fuerza gravitatoria sobre la estrella se encuentre entre dos valores dados.

En los ecosistemas se presentan muchos casos donde variables que fluctúan al azar pueden influir en la evolución a largo plazo. La previsión del número de individuos de las poblaciones se basa en recuentos de muestras de diversas poblaciones rivales, efectuados a lo largo de muchos años. Los resultados de tales recuentos varían con los métodos empleados para la elaboración del censo; los propios puntos exactos de variación resulta, a menudo, difíciles de cifrar. Puede llevarse a cabo una previsión más fiable si tales variaciones se tratan matemáticamente como variables fluctuantes aleatorias. De modo semejante, las fluctuaciones impredecibles de frecuencias genéticas en una población animal pueden conducir a la fijación de un solo genotipo; la mejor manera de abordar el proceso correspondiente es a través de un planteamiento de las fluctuaciones cual si fueran sucesos aleatorios.

Economía y navegación

Más reciente es la aplicación de análisis probabilísticos, basados en las matemáticas del movimiento browniano, a la economía. Los profesionales de esta rama han utilizado tales técnicas para justificar el comportamiento de precios de mercado, las tasas de inflación, las de interés y otras variables financieras. En este contexto, el precio de una partida es controlada en parte por opciones de comercio, que son contratos que dan derecho a comprar o vender la partida en un período especificado. Se espera que el precio de la partida fluctúe según el número y el precio de las opciones negociadas; dicha fluctuación se superpone al precio que presumiblemente determinarían las puras fuerzas de mercado en ausencia de opciones. El objetivo es, como siempre, la predicción del precio futuro de la partida con la mayor fiabilidad posible.

Una vez estimados los efectos de una fluctuación aleatoria, lo que se pretendería a continuación sería la posibilidad de controlarlos. De nuevo, las técnicas matemáticas desarrolladas en una disciplina han experimentado una rápida generalización. Un método de control estadístico, semejante al desarrollado para mejorar la recepción de las señales de radar durante la segunda guerra mundial, lo explotan hoy muchos sistemas que recogen entradas continuas de datos; por ejemplo, los sistemas de radionavegación. También se ha aplicado al control de calidad de las mercancías fabricadas en serie.

Aunque se ha desentrañado la naturaleza del movimiento browniano que dio origen a la teoría, queda mucho camino por andar en lo concerniente al desarrollo de sus analogías matemáticas. Si nos atenemos a la historia, el movimiento browniano seguirá reapareciendo, en formas cada vez más abstractas, para iluminar las disciplinas más dispares, durante muchos años.

Exito reproductor en el ciervo común

Un estudio de alrededor de un millar de estos animales gregarios, desarrollado durante 12 años en una reserva natural escocesa, ha revelado los factores que determinan el éxito reproductor entre machos y hembras del ciervo común

T. H. Clutton-Brock

En una remota hoya de la isla escocesa de Rhum, un macho de ciervo común, o rojo, se yergue entre sus ciervas. Ha cumplido ya los diez años de edad, y es probable que el gran harén que le rodea en el césped repelado sea el último que posea. Hay en el harén ciervas de todas las edades. Dos viejas matriarcas pacen en lados opuestos del grupo. Tienen 15 y 13 años. Cada una de ellas preside una gran familia de hijas maduras, con las que comparten los dos kilómetros cuadrados de páramo, laderas y fondo del valle que constituyen su dominio vital. Entre las matriarcas se encuentran sus ocho hijas, tres de las cuales tienen el pelaje liso y brillante y los cuartos traseros redondeados, sin cervatos a sus pies. Cinco tienen cervatos, y las siluetas angulosas de las madres atestiguan el alto coste de la lactancia. Dos hembras de tres años, que quedarán preñadas por primera vez este año, ramonean las laderas de una ligera depresión en las dunas. Ocho ciervos de dos años de edad, añojos y cervatos se encuentran diseminados por todo el grupo. A unos 200 metros de distancia, tres machos de un año, separados recientemente de sus grupos maternos por el amo del harén, pacen inquietos, pues todavía no se han acostumbrado a la independencia.

Sobre las lomas que se levantan detrás del harén aparece un macho de seis años, negro de revolcarse en las turberas. Avanza decidido hacia el grupo de hembras, se detiene y emite una serie de bramidos carraspeantes, más parecidos al rugido del león que al trompeteo del uapití americano. El dueño del harén replica, y durante unos 15 minutos los dos machos intercambian bramidos repetidamente. Luego, con pasos lentos y deliberados, el retador se acerca más al harén; el ciervo propietario sale a su encuentro. Casi se tocan, pero entonces, como si obedecieran a un mutuo acuerdo, giran en una andadura paralela, y marchan, tensos, separados una docena de metros.

Así andan de un lado para otro hasta que el macho residente, después de haber advertido una ventaja potencial, corre hasta la cima de un pequeño altozano, inclina la cabeza y carga contra el retador. El macho de seis años baja inmediatamente la testuz para poner en juego su cuerna, y los dos ciervos chocan con el ruido seco de cornamenta sobre cornamenta. Ambos apuntalan sus patas anteriores hacia delante, empujando fuerte con los cuartos traseros tiesos. Giran en círculo una vez. De pronto, el macho joven salta hacia delante, intentando embestir de lado al macho mayor, pero el residente apuntala sus patas posteriores y fuerza lentamente a su oponente a que levante la cabeza. Con un giro rápido aparta la testa del macho joven, lo empuja de lado y carga contra su flanco expuesto. El retador da vuelta y huye. Durante unos pocos metros el ganador lo persigue; luego se detiene y brama hacia el rival en retirada antes de volver hacia sus ciervas, que no han mostrado el menor interés por la lucha, persistiendo en su metódico pacer. El propietario mantendrá el harén cuando menos hasta el siguiente desafío, pero, a su edad, empiezan a flaquearle las fuerzas. Es probable que el año siguiente el combate arroje un resultado distinto.

Esta interacción pone de manifiesto una diferencia fundamental entre machos y hembras, observada en casi todos los mamíferos en los que los machos con éxito monopolizan el acceso reproductor a varias hembras. Puesto que nacen, aproximadamente, el mismo número de machos y hembras, la capacidad de algunos machos para mantener harenes de 10 a 20 hembras significa necesariamente que cada año una gran proporción de machos no se reproducen. De ahí que la competencia por los harenes sea intensa y que se luche regularmente por su posesión.

La situación es distinta para las hembras. El éxito reproductor de una cierva no guarda relación directa con el número de compañeros de cópula. Depende, en cambio, del número de descendientes que produce y cría a lo largo de su vida. Dado que los costes de la gestación y de la lactancia son elevados, es más probable que el éxito de una hembra dependa principalmente de los recursos alimentarios de que disponga.

La diferencia entre machos y hembras en el tipo de competencia cuando los machos defienden sus harenes indica que las características que afectan al éxito reproductor deben también diferir entre los sexos. La capacidad de lucha, un gran tamaño corporal y armas muy desarrolladas resultarán importantes para los machos. En cambio, poca ventaja habrá para las hembras en la lucha por recursos alimentarios que se hallan ampliamente dispersos. Es más probable que su éxito dependa principalmente de la eficacia a la hora de extraer alimento de su ambiente y de transformarlo en descendencia. Tal conclusión no supone forzosamente que su capacidad para desplazar a otras hembras de los lugares de alimentación no sea importante, sino que implica que la capacidad de ganar en el combate probablemente no tenga un efecto tan notable sobre su éxito reproductor como ocurre entre los machos.

Es probable que las diferencias en los determinantes del éxito reproductor entre machos y hembras sean más acusadas en las especies poligínicas (en las



1. MACHO DE CIERVO COMUN acompañado de su harén de ciervas en la isla escocesa de Rhum, en las Hébridas interiores. El éxito reproductor de los machos de ciervo común aumenta con el tamaño de su harén, que, a su vez, depende de la capacidad de lucha del ciervo; el macho que pierde una lucha contra un ciervo retador se queda sin su harén, y quizá no sea capaz de recuperarlo. En el centro de este grupo se distingue un cervato. Las cinco ciervas ramonean algas marinas a lo largo de la orilla de la isla. El tamaño del harén de un macho puede oscilar entre una y 20 ciervas. (Fotografía del autor.)



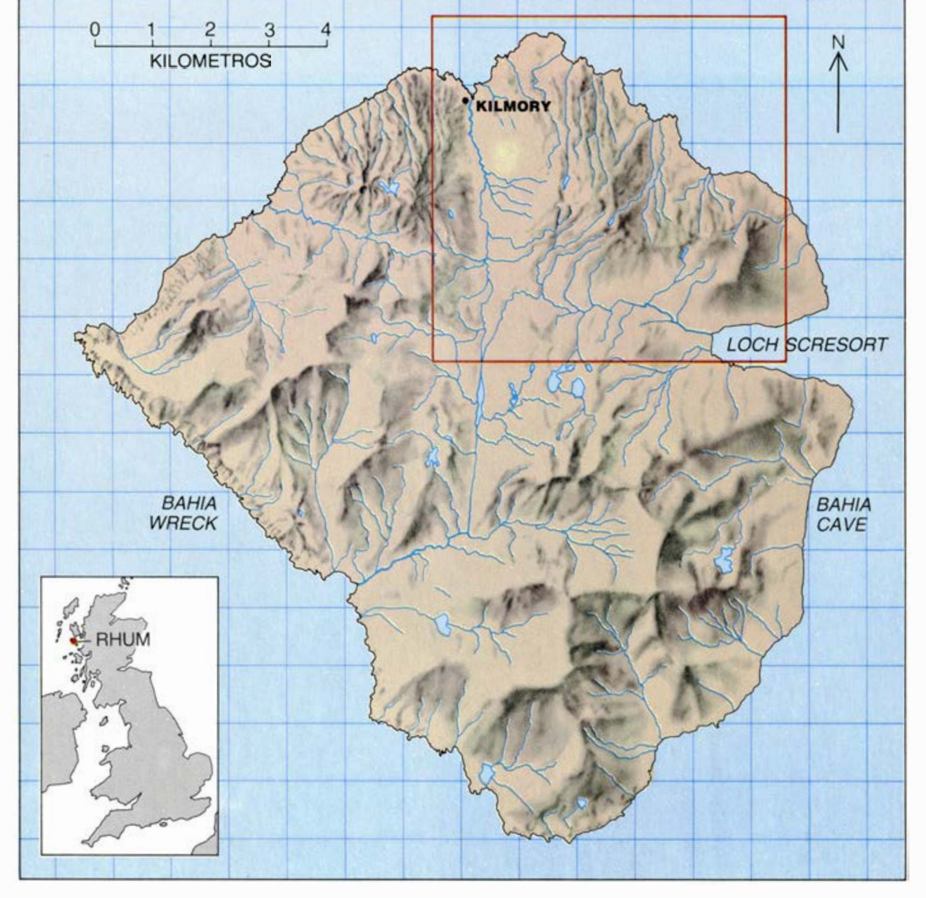
2. DUEÑO DE UN HAREN que responde con bramidos al reto de un macho más joven. Si el retador continúa acercándose, el propietario y el intruso ejecutarán un paseo en paralelo para observarse mutuamente a corta distancia. Aproximadamente el 40 por ciento de esos paseos terminan en lucha.

que los machos monopolizan el acceso reproductor a varias hembras) o en las poliándricas (en las que las hembras monopolizan el acceso reproductor a varios machos) que en las especies monógamas. En estas últimas, la competencia entre machos y entre hembras tiende a adoptar pautas más próximas.

Los factores contrastantes que afectan al éxito reproductor en los machos y en las hembras son la causa de buena parte de las diferencias entre los sexos. Excepto en los animales que se reproducen de forma cooperativa, la selección favorecerá aquellos rasgos que aumenten el éxito reproductor del individuo. Cuando un rasgo condicione el éxito reproductor, se hallará más desarrollado en aquel sexo, a buen seguro. Por ejemplo, en especies en las que el tamaño del cuerpo incide en el éxito reproductor de los machos más que en el de las hembras, y los costos de un tamaño grande son similares para los dos sexos, los machos serán mayores que las hembras. El fenómeno se advierte en los ciervos comunes europeos y en los ciervos americanos, o uapitíes: el peso de los machos llega casi a doblar al de las hembras. Este razonamiento predice, asimismo, que las diferencias sexuales probablemente aumenten con el grado de poliginia o de poliandria.

Si las diferencias en los determinantes del éxito reproductor subyacen a la mayoría de las diferencias sexuales, en lo concerniente a morfología y comportamiento, la comprensión de los factores que afectan al éxito reproductor en machos y hembras ayudará a predecir y explicar las diferencias entre los sexos. Sin embargo, averiguar las causas de la variación en el éxito reproductor no es tarea fácil. Lo que importa es, desde luego, el éxito del individuo a lo largo de toda su vida. Pero ni siquiera el número de descendientes criados pudiera constituir una buena medida del éxito, puesto que las crías que nacen en camadas grandes podrían tener una probabilidad menor de reproducirse con éxito. El número de nietos sería una medida mejor del éxito de un individuo, pero los problemas logísticos asociados a la comprobación de tal número en animales salvajes son enormes. Pocas son las especies en las que quepa medir incluso el éxito reproductor de los individuos a lo largo de una estación determinada, menos aún el número de nietos de cada individuo.

Excepción constituye el ciervo común (*Cervus elaphus*) de Escocia, especie distribuida por toda Europa, España incluida, y que pertenece al mismo género que el uapití americano. Ambos sexos destacan con claridad en el hábitat prácticamente deforestado de las Highlands. Con paciencia, el observador llega a reconocer a los individuos por la estructura facial y el modelo de pelaje. Los ciervos tienen una estación de apareamiento corta y predecible en octubre, cuando los machos defienden harenes bien definidos. Los cervatos, que nacen en el mes de junio siguiente, se pueden capturar, marcar y pesar. Además, ambos sexos cubren un arco vital suficientemente breve (unos 10 años los ciervos y 12 las ciervas) para que los observadores humanos sigan la vida entera de algunos individuos.



3. ISLA DE RHUM, que ha acogido un estudio del ciervo común durante 12 años, realizado por el autor y sus colegas. La isla, situada frente a la costa noroccidental de Escocia, constituye una Reserva Natural Nacional del Reino Unido. La zona de estudio es la sección nororiental de la isla (*recuadro de color*).

Estas son las razones por las que mis colegas Fiona Guinness, Stephen Albon y yo mismo, de la Universidad de Cambridge, hemos pasado los últimos 12 años observando ejemplares en la isla de Rhum, de las Hébridas interiores. En todo momento, nuestra zona de estudio abarcaba alrededor de 300 ciervos comunes, si bien en el decurso del estudio más de 1000 pasaron por nuestra población. En los últimos años, los cervatos que capturamos y marcamos en la primera parte del estudio empiezan a culminar su ciclo vital, y va patentizándose ya una imagen de lo que determina el éxito reproductor en machos y hembras.

Tal éxito varía más entre los ciervos que entre las ciervas. El número de cervatos que engendra un ciervo anualmente va de ninguno a unos 10. (Este número baja a seis cuando se considera solamente el número de cervatos que sobreviven por lo menos un año.)

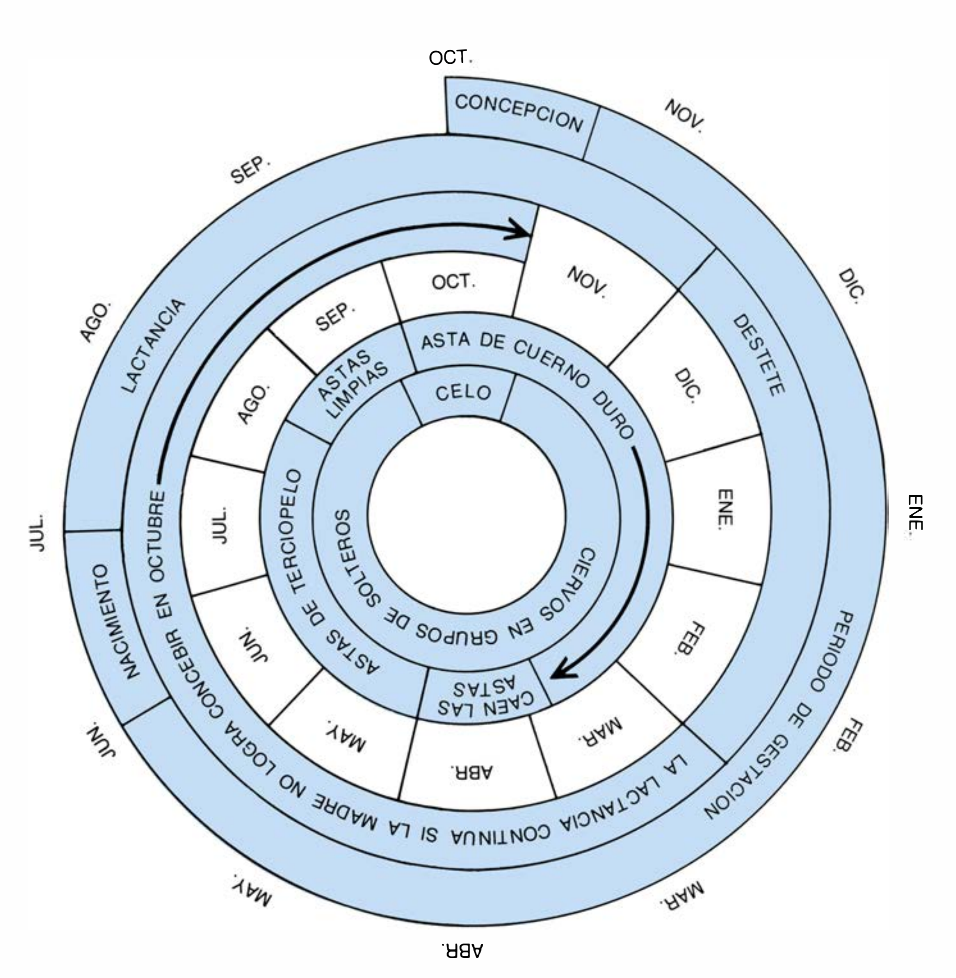
Las diferencias del éxito serían muy grandes si estos contrastes se mantuvieran a lo largo de toda la vida de un ciervo, pero no ocurre así. El éxito reproductor de un ciervo está muy afectado por su edad, y por lo general es máximo entre las edades de siete y nueve años. En un momento dado puede estimarse el éxito de un ciervo por el tamaño de su harén, pero la variación del éxito reproductor a lo largo de la vida es menor de lo que parecen sugerir las grandes diferencias en el tamaño del harén en cada estación. Incluso los machos con más éxito raramente procrean más de dos docenas de hijos supervivientes a lo largo de toda su vida.

En cambio, la variación en el éxito

reproductor entre las hembras es mayor de lo que parece indicar el que una cierva tenga como máximo un cervato por año. Por una razón: las ciervas tienden a perder sus cervatos a lo largo de todo su período reproductor (de seis a 12 años). El número de cervatos supervivientes que crían las hembras durante su vida va de ninguno a 10, y está muy relacionado con el número de sus nietos.

El éxito reproductor de un individuo depende de tres componentes: la duración de su vida, el número de descendientes producido por año y la proporción de descendientes que sobreviven. La importancia relativa de esos componentes difiere bastante de un sexo a otro. El éxito de una cierva depende en parte de que viva largo tiempo, pero principalmente de la proporción de sus cervatos supervivientes. Algunas engendran un cervato por año a lo largo de toda su vida, pero no consiguen nunca criar con éxito ni siquiera uno.

En cambio, entre los machos las diferencias de éxito reproductor dependen casi por entero, entre las edades de seis y once años, del número de descendientes que engendran por año. Las diferencias en la supervivencia entre cervatos engendrados por distintos ciervos es pequeña; la duración de la vida de un ciervo más allá de la edad de 11 años apenas incide en su éxito reproductor global.



4. CICLO REPRODUCTOR del ciervo común en Rhum, esquematizado. Los dos anillos externos corresponden al ciclo de las ciervas, los dos interiores al de los ciervos. La estación de reproducción es el otoño; más del 80 por ciento de las ciervas concibe en octubre. Siguiendo el ciclo desde octubre (*arriba*), se advierte que el cervato nace en junio, como ocurre en la mayoría de cervatos de ciervo común. Se destetará seis o siete meses después si la madre concibe de nuevo, pero no hasta 18 meses después del nacimiento si la madre no logra concebir en el segundo otoño. El anillo externo del ciclo de los ciervos indica el estado mensual de las astas. El anillo interno muestra la estación reproductora, claramente definida.

Los factores que afectan al éxito reproductor no son iguales entre machos y hembras. La capacidad de una hembra para criar cervatos viene condicionada, sobre todo, por la calidad de su área vital (que afecta a su acceso a los recursos alimentarios), el número de animales con los que la comparte (que determina la intensidad de competencia por el alimento) y su dominancia social (que afecta a su prioridad de acceso a lugares de alimentación preferidos). Una cierva hereda de su madre un área vital y la comparte con sus hermanas y otras parientes matrilineales, de modo que gran parte de su éxito reproductor depende de la identidad y tamaño de su familia. Su rango de dominancia está relacionado con su peso al nacer y su peso adulto: los cervatos pesados crecen rápidamente y se transforman en hembras grandes y dominantes.

En cambio, el éxito reproductor de los machos depende casi por entero de su capacidad de lucha, que a su vez está relacionada con su tamaño corporal y su crecimiento durante el primer año de vida. En el ciervo común, así como en muchas otras especies en las que los machos son mayores que las hembras, el crecimiento del macho se resiente mucho más de la escasez de alimentos que el de la hembra. En parte por esa razón, y en parte porque el éxito reproductor varía más ampliamente entre los machos que entre las hembras, el de los ciervos está incluso más influido por la dominancia y el tamaño corporal de su madre que el éxito de la hembra. En consecuencia, los hijos de ciervas dominantes tienen más éxito que las hijas, mientras que las hijas de las ciervas subordinadas aventajan a los hijos.

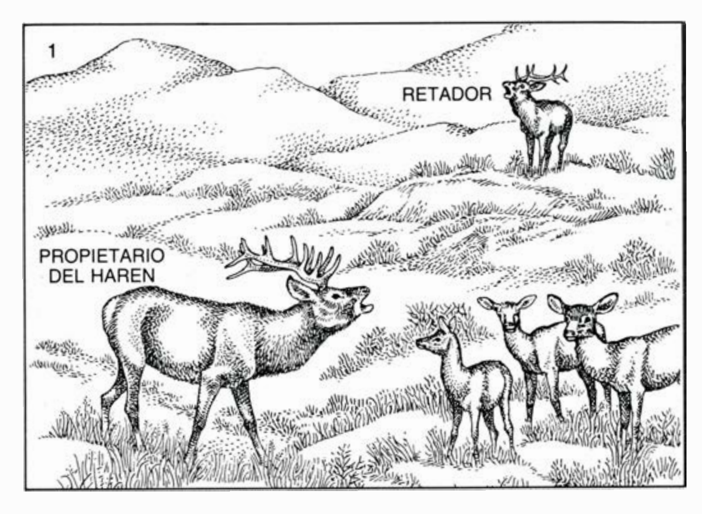
Los factores contrastantes que afectan al éxito reproductor de los machos y las hembras proporcionan datos importantes sobre los orígenes evolutivos de muchas diferencias sexuales en la morfología, la fisiología y el comportamiento. Las razones de algunas diferencias sexuales son evidentes. El hecho de que el tamaño y la capacidad de lucha resulten tan importantes para los machos de ciervo común indica por qué doblan casi el peso de las hembras y han desarrollado unas complejas defensas en forma de cornamenta. Como esta explicación predice, las diferencias sexuales en el tamaño del cuerpo son mayores en las especies de ciervos en las que los machos que tienen éxito poseen gran número de hembras, según se observa en los ciervos europeos comunes y en los uapitíes. Son menores en los corzos, los muntiacs y otras especies en las que son escasas las oportunidades de los machos para reproducirse de forma poligínica, porque las hembras adultas se hallan ampliamente distribuidas.

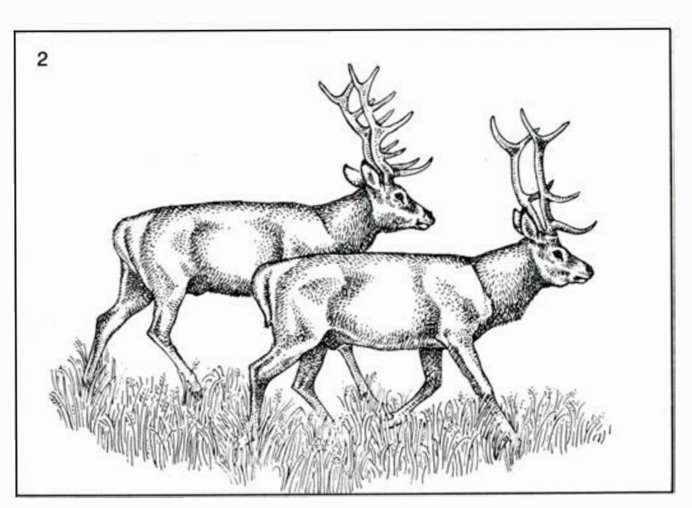
Los factores contrastantes que afectan al éxito reproductor de machos y hembras esclarecen asimismo el origen de diferencias menos evidentes entre los sexos. En muchas especies de mamíferos (ciervo común incluido), los machos juveniles crecen más rápidamente que las hembras, pero depositan menos grasa corporal, renunciando a las ventajas que proporcionan las reservas de grasa en favor de las que ofrece

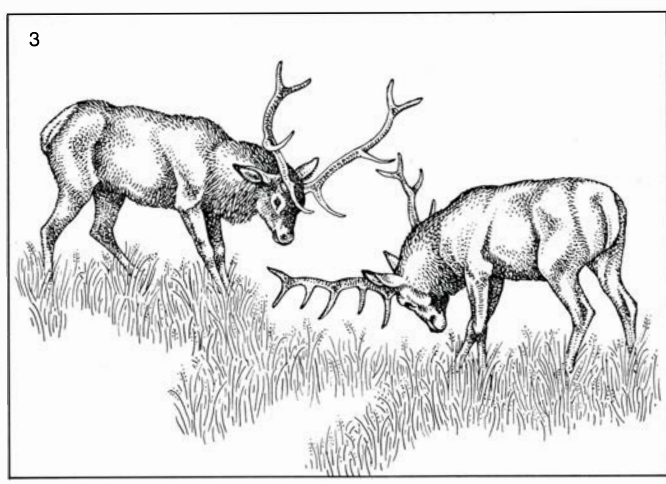
un rápido crecimiento inicial y un tamaño adulto respetable.

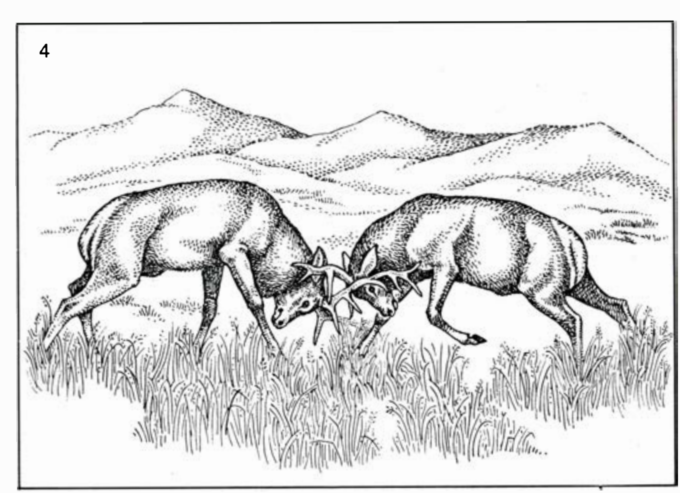
También esas diferencias varían de manera sistemática en las distintas especies. Las diferencias sexuales en deposición de grasa juvenil son más pronunciadas en las especies poligínicas (en las que otras diferencias físicas son también mayores). En las especies menos dimórficas el contenido en grasa juvenil es aproximadamente el mismo en machos y hembras. En el ciervo acuático chino (la única especie de ciervo cuyas hembras son mayores que los machos), los machos poseen más grasa en su juventud.

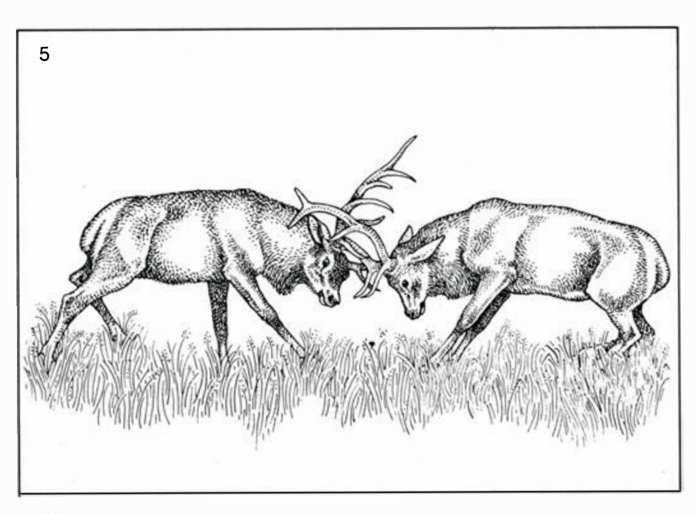
Estos rasgos masculinos, verbigracia, tamaño mayor, tasas de crecimiento más rápidas y escasas reservas de grasa, deben tener sus costes, de lo contrario las diferencias entre los sexos aumentarían continuamente. En el ciervo común y en muchos otros mamíferos que presentan dimorfismo sexual los machos viven menos que las hembras y son más propensos a morir de hambre durante períodos de escasez alimenta-

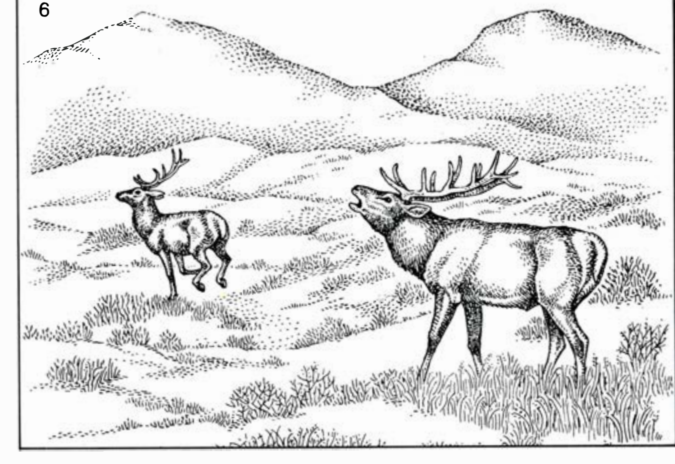












5. DESAFIO AL PROPIETARIO DEL HAREN; se inicia cuando un joven ciervo se le acerca (*1*). Los dos ciervos braman durante varios minutos. Si el retador se acerca más, el propietario va a su encuentro. En la mayoría de los casos sigue un paseo en paralelo (*2*); los ciervos van de un lado a otro, separados varios metros durante varios minutos. Si el retador no se retira, uno de los ciervos inicia la lucha girando y agachando la cuerna (*3*). Ambos entrelazan las cornamentas y se empujan (*4*). En este encuentro gana el propietario: fuerza el retroceso del retador (*5*), que huye, perseguido por el vencedor (*6*).

ria o de clima riguroso. Uno de los ejemplos más espectaculares entre los registrados se refiere a la población de renos de la isla de San Mateo, en el mar de Bering: una población de más de 6000 adultos se redujo a 42 en el curso de un solo invierno; sólo uno de los supervivientes era macho.

Diferencias sexuales en la supervivencia se dan también entre los juveniles. Los ciervos comunes macho tienen mayor probabilidad que las hembras de morir durante el invierno cuando son cervatos o añojos. En los primeros años de nuestro estudio, en los que la densidad de población era bastante baja, no se manifestaban diferencias sexuales en la mortalidad juvenil; pero, a medida que la densidad fue aumentando, la situación cambió. En la actualidad, alrededor del 60 por ciento de los machos muere durante su primer o segundo invierno. Para las hembras la tasa es del 30 por ciento.

Las diferencias sexuales en los efectos del crecimiento temprano sobre el éxito reproductor sugieren que podría esperarse que las madres de los mamíferos trataran de forma distinta a hijos e hijas. El hecho de que el crecimiento temprano y la inversión materna en forma de leche probablemente influyan sobre el éxito reproductor de un macho sugiere que las madres pueden aumentar el número de sus nietos dedicando mayor proporción de su esfuerzo reproductor a sus hijos que a sus hijas. Existen algunos indicios de que así lo hacen. Los cervatos macho del ciervo común nacen con cerca de medio kilogramo más de peso que las hembras. Diferencias semejantes se encuentran en especies que producen camadas.

AÑO	CIERVAS NACIDAS EN 1972		
	PRIMER INDIVIDUO (THII)	SEGUNDO INDIVIDUO (MOMC)	TERCER INDIVIDUO (COLC)
1972	THII (CERVATO)	MOMC (CERVATO)	COLC (CERVATO)
1973	THII (AÑOJO)	MOMC (AÑOJO)	COLC (AÑOJO)
1974	THII (DOS AÑOS)	MOMC (DOS AÑOS)	COLC (DOS AÑOS)
1975	SIN DESCENDENCIA	SIN DESCENDENCIA	SOBREVIVE EL CERVATO
1976	SOBREVIVE EL CERVATO	MUERE EL CERVATO EN VERANO	MUERE EL CERVATO EN VERANO
1977	SOBREVIVE EL CERVATO	MUERE EL CERVATO EN VERANO	SOBREVIVE EL CERVATO
1978	THII MUERE	MUERE EL CERVATO EN VERANO	SOBREVIVE EL CERVATO
1979		MUERE EL CERVATO EN EL SEGUNDO INVIERNO	SOBREVIVE EL CERVATO
1980		MUERE EL CERVATO EN EL PRIMER INVIERNO	SOBREVIVE EL CERVATO
1981		SIN DESCENDENCIA	MUERE EL CERVATO EN VERANO
1982		MUERE EL CERVATO EN EL SEGUNDO INVIERNO	SOBREVIVE EL CERVATO
1983		MUERE EL CERVATO EN EL PRIMER INVIERNO	SOBREVIVE EL CERVATO
1984		SIN DESCENDENCIA	SIN DESCENDENCIA
NUMERO DE DESCENDIENTES QUE SOBREVIEN	2	0	7

6. EXITO REPRODUCTOR DE LAS CIERVAS, correspondiente a tres de las hembras nacidas en la isla de Rhum en 1972. La comparación de Momc con Colc indica hasta qué punto el éxito reproductor, medido en términos de los cervatos que sobreviven hasta la edad adulta, varía entre las hembras de ciervo. En él influye el rango social: Colc era cierva dominante, mientras que Momc era subordinada.

Puesto que es probable que el crecimiento durante las primeras semanas de la vida afecte más al éxito reproductor de los machos que al de las hembras, cabría esperar que las madres proporcionasen más leche a sus hijos. Los cervatos macho de ciervo común de Rhum maman durante más tiempo y más a menudo que las hembras. En otros varios mamíferos poligínicos se han observado tasas de amamantamiento mayores en los machos jóvenes.

De nuestra comparación entre ciervas según hubieran criado hijos o hijas se desprende que la crianza comporta los mayores costes a cuenta del subsiguiente éxito reproductor de la madre. En cualquier estación, alrededor del 25 por ciento de las ciervas no engendran. El fracaso reproductor se debe, en gran parte, a que llegan al otoño en malas condiciones físicas. En nuestra población, el 33 por ciento de las madres que crían hijos no logra reproducirse al año siguiente, en comparación con el 18 por ciento de las madres que crían hijas. La fecha de concepción también guarda relación con el estado de la cierva en otoño. Las ciervas conciben casi dos semanas más tarde el año después de criar un macho que el año después de criar una hembra.

El razonamiento de que las madres invierten más en los hijos para maximizar el número de sus nietos no se aplica necesariamente a todos los individuos de una población. Como señaló Robert L. Trivers, de la Universidad de California en Santa Cruz, es de esperar que las madres inferiores, cuya mala condición física hace poco probable que críen hijos con éxito, abandonen a su progenie masculina poco después del nacimiento, con lo que conservan sus recursos para sucesivos intentos reproductores. Por ejemplo, las ciervas subordinadas llegan a retirar la leche a los hijos con pocas probabilidades de salir adelante.

¿Es éste el caso? Si fuera así, los hijos de madres subordinadas serían más propensos a la muerte que las hijas, mientras que no se encontrarían

AÑO	CIERVOS NACIDOS EN 1972			
	PRIMER INDIVIDUO (BROC)		SEGUNDO INDIVIDUO (YHOC)	
	TAMAÑO MEDIO DEL HAREN	CERVATOS ENGENDRADOS	TAMAÑO MEDIO DEL HAREN	CERVATOS ENGENDRADOS
1972	CERVATO		CERVATO	
1973	AÑOJO		AÑOJO	
1974	DOS AÑOS DE EDAD		DOS AÑOS DE EDAD	
1975	TRES AÑOS DE EDAD		TRES AÑOS DE EDAD	
1976	SIN HAREN	NINGUNO	UNA CIERVA	NINGUNO
1977	SIN HAREN	NINGUNO	CUATRO CIERVAS	CUATRO CERVATOS
1978	UNA CIERVA	NINGUNO	TRES CIERVAS	DOS CERVATOS
1979	SIN HAREN	NINGUNO	CUATRO CIERVAS	DOS CERVATOS
1980	TRES CIERVAS	UN CERVATO	CINCO CIERVAS	TRES CERVATOS
1981	DOS CIERVAS	NINGUNO	CINCO CIERVAS	DOS CERVATOS
1982	SIN HAREN	NINGUNO	MUERE	
1983	MUERE			

7. EXITO REPRODUCTOR DE DOS CIERVOS, evaluado por el tamaño del harén y el número estimado de cervatos engendrados por año. El tamaño del harén depende de la capacidad de un ciervo para ganar y mantener su harén en las luchas contra sus retadores, que es máxima a la edad de siete a 10 años.

diferencias sexuales en la supervivencia entre hijos e hijas de los animales dominantes. Los datos referidos al ciervo común muestran precisamente dicha pauta: el 51 por ciento de los hijos nacidos de madres subordinadas mueren durante sus dos primeros años de vida, comparado con el 30 por ciento de las hijas. No se encuentra diferencia sexual similar entre los hijos y las hijas de las madres dominantes: el 38 por ciento de sus hijos muere durante sus dos primeros años de vida, al igual que el 36 por ciento de sus hijas.

Sin embargo, abandonar los hijos después de traerlos al mundo comporta un elevado coste, puesto que cada uno de ellos representa una gran fracción del potencial reproductor de la vida de una hembra. Las madres podrían aumentar su éxito reproductor manipulando la proporción sexual antes del nacimiento; lo ideal sería tan cerca de la concepción cuanto fuera posible. La relación entre rango de la hembra y éxito reproductor de la descendencia masculina o femenina deja pocas dudas de que las madres dominantes aumentarían el número de sus nietos si parieran más hijos que hijas, y que lo contrario ocurriría para las subordinadas.

¿Sucede así? Comparamos ciervas clasificadas en tres categorías de igual rango. El cotejo demostró que la proporción sexual de los cervatos se situaba alrededor del 47 por ciento de machos para las ciervas subordinadas, en el 54 por ciento para las de rango medio y en el 61 por ciento para las ciervas dominantes. Las diferencias se mantenían en las ocho cohortes de ciervas de las que poseíamos datos de reproducción, que cubrían al menos el 75 por ciento de la duración de su vida. Además, entre madres individuales la proporción sexual aumentaba con el rango de la madre, desde alrededor de un 30 por ciento de cervatos macho hasta un 70 por ciento para las hembras dominantes. El rango en el que los individuos sobrepasaban la proporción sexual media para la población coincidía estrechamente con el punto en el que los hijos tenían más éxito que las hijas. Un estudio de macacos bunder de Puerto Rico arrojó resultados similares.

Sorprenden estos resultados, pues la investigación de distintos grupos de aves y mamíferos domésticos ha dejado por imposible pretender trabajar con la proporción sexual de la progenie en el nacimiento mediante reproducción selectiva. Una posible explicación: variaría en la proporción sexual en respuesta a diferencias individuales de tamaño o estado de la madre en poblaciones en las que el alimento es limitado. Quizás en los animales domésticos no se den tendencias equivalentes porque tales animales se mantienen en un nivel de alimentación artificialmente alto, de modo que las diferencias de condición física son pequeñas. Alternativamente, pudiera haberse perdido en los animales domésticos la capacidad de variar la proporción sexual en respuesta a cambios ambientales por efecto de la selección artificial persistente a lo largo de muchas generaciones.

Nuestra investigación, sin embargo, no muestra si la variación en la proporción sexual, que procede, bien de diferencias sexuales en la mortalidad después del nacimiento, o bien de la variación en la proporción sexual al nacer, la controla la madre. Cabría que los machos jóvenes estuvieron en general más inermes que las hembras jóvenes ante la escasez de alimento. Si así fuera, ello explicaría por qué los hijos de madres subordinadas tienen más probabilidad de morir que las hijas. Las comparaciones en el amamantamiento entre hijos e hijas de ciervas subordinadas ha dado hasta ahora resultados ambiguos.

Otra posibilidad es que las ciervas subordinadas paran menos hijos que las ciervas dominantes porque su descencencia masculina sea más propensa a morir antes del nacimiento. Estudios en varios mamíferos demuestran que la proporción sexual de los fetos abortados tiene un sesgo en favor de los machos.

Sin embargo, una menor supervivencia de los fetos macho explicaría nuestros resultados en el caso de que todas las hembras concibieran una proporción sexual sesgada hacia los machos. Pero resulta que las dominantes producen significativamente más del 50 por ciento de machos. Además, si la tendencia observada aparece porque las madres subordinadas pierden los fetos macho durante la gestación, las subor-

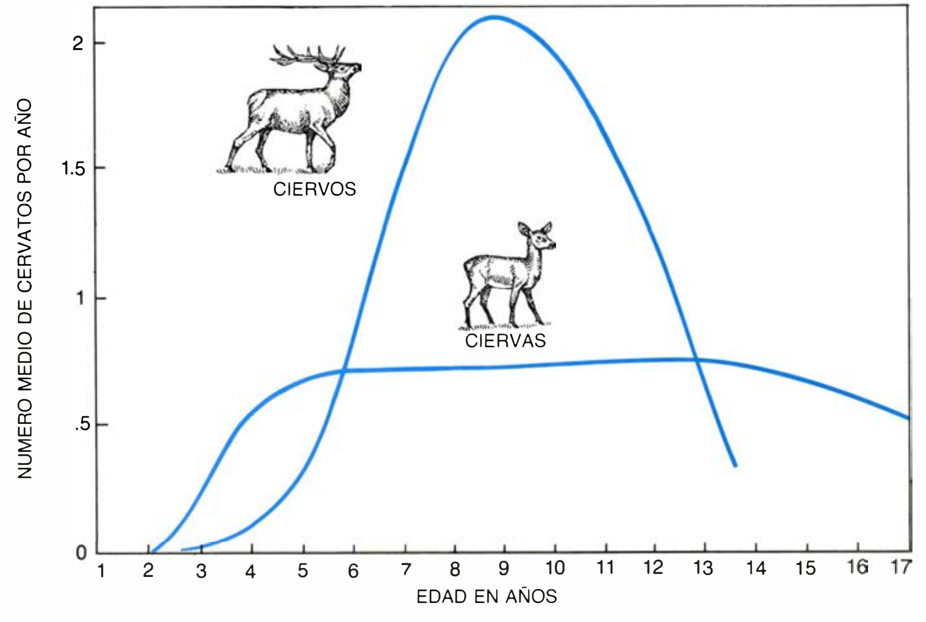
dinadas debieran producir menos cervatos que las dominantes. Las diferencias en fecundidad entre las ciervas dominantes y las subordinadas son demasiado pequeñas para explicar la diferencia en las proporciones sexuales.

Nuestros registros de los ciclos vitales del ciervo común en Rhum plantean muchas preguntas acerca de las causas de las tendencias reproductoras en los mamíferos, preguntas que sólo podrán contestarse mediante experimentos controlados en condiciones de laboratorio. ¿Por qué los machos son más sensibles que las hembras a la escasez de comida? ¿Responden las madres de forma distinta a su descendencia masculina y femenina, o acaso las diferencias en las tasas de amamantamiento obedecen a diferencias sexuales en la demanda? ¿Qué mecanismos subyacen al continuo sesgo masculino en las proporciones sexuales en el nacimiento que se observa en muchos mamíferos? ¿Conciben más hijos macho las ciervas pequeñas y subordinadas que las dominantes?

No es probable que en Rhum logremos obtener respuestas definitivas a ninguna de esas preguntas. No obstante, nuestra investigación ilustra el papel que los estudios de campo de las estrategias reproductoras de los animales en sus ambientes naturales pueden desempeñar a la hora de sugerir la dirección de la investigación en campos relacionados. Por citar un ejemplo, parece probable que los intentos de manipulación experimental de la proporción sexual en el nacimiento hubieran tenido más éxito de haberse desarrollado en animales que presentan un dimorfismo sexual pronunciado y de haberlos mantenido en condiciones de limitación del alimento.

Para someter a prueba muchas de las explicaciones funcionales de las diferencias sexuales hasta ahora sugeridas, los estudios futuros precisarán del examen de los determinantes del éxito reproductor en especies que no se ajustan a las tendencias generales. Por ejemplo, las cebras y las hienas manchadas, como el ciervo común europeo, se reproducen poligínicamente, pero es poca la diferencia de tamaño entre las cebras macho y las hembras, mientras que las hembras de hiena manchada son mayores que los machos. ¿Es similar el efecto del tamaño corporal en el éxito reproductor de machos y hembras de cebra? ¿Afecta el tamaño al éxito de las hembras de hiena manchada más que al de los machos?

También habrá que realizar estudios de especies con sistemas de reproducción contrastantes. ¿Suelen ser los determinantes del éxito reproductor de ambos sexos más parecidos en las especies monógamas que en las poligínicas? ¿Cómo difieren en las especies poliándricas? El reto que aguarda a los biólogos de campo que investiguen esos problemas será encontrar especies en las que resulte factible la medición del éxito reproductor de ambos sexos a lo largo de toda su vida natural y la investigación de las causas de las diferencias entre individuos.



8. LA EDAD INFLUYE sobre el éxito reproductor de los machos de ciervo común; la capacidad de lucha de un ciervo aumenta con su edad, pero disminuye cuando sobrepasa su plenitud. La edad resulta menos importante para las ciervas, en las que el éxito reproductor no depende de la capacidad de lucha.

Radares de barrido electrónico

Rastrean y siguen los objetos sin mover su antena. Para dirigir el haz, aprovechan la interacción de ondas entre las señales procedentes de una multitud de pequeños elementos de antena

Eli Brookner

La antena parabólica del radar en giro incesante, barriendo con su haz de microondas todo el horizonte en busca de objetos lejanos, es un lugar común de las películas y, en forma de radar de aeropuerto, algo habitual en nuestra experiencia diaria. Lo ha sido hasta ahora, pues en la mayoría de los usos frecuentes del radar (aviación, defensa aérea y espionaje) la parábola orientada mecánicamente está cediendo su puesto a una nueva clase de dispositivo. Un banco plano de pequeñas antenas idénticas, cada una capaz de transmitir y recibir señales, ocupa el lugar del reflector cóncavo; y aun cuando su haz explora grandes extensiones de cielo, el radar no se mueve. Antes bien, la señal se desvía de un blanco a otro electrónicamente, orientada mediante el principio de interferencia de ondas. Esta nueva técnica se conoce como radar de barrido electrónico o gobernado en fase.

Las nociones fundamentales relativas al radar permanecen inalteradas en su nueva indumentaria. Todos los radares funcionan emitiendo haces direccionales de energía radiante. Lo más frecuente es que la energía caiga dentro de la banda de las microondas, desde 300 millones a 10.000 millones de hertz, aunque algunos radares de largo alcance operan, sin embargo, en las bandas de alta frecuencia (HF) y de muy alta frecuencia (VHF), de 3 a 30 millones de hertz la primera, y de 30 a 300 millones de hertz la segunda. Según la forma de la antena, la radiación constituye un haz delgado en pincel, apropiado para el seguimiento preciso, o un haz disperso, en abanico, ideal para explorar amplias zonas del cielo.

Cuando el haz choca contra un objeto, se refleja. Y si la energía del impulso transmitido, la sensibilidad de la antena y la cualidad reflectora del objeto alcanzan cierto valor, la antena recibirá un eco de retorno detectable. De acuerdo con el modelo de radar y el tipo de impulso transmitido, el eco suministra diversas clases de información.

La dirección de donde procede el eco da la posición del objeto. Si el radar transmite impulsos de energía en vez de una señal continua, el tiempo transcurrido entre la transmisión de un impulso y su eco indica la distancia del objeto. Algunos radares están proyectados también para calibrar el corrimiento Doppler del eco, variación en la frecuencia de una señal que se produce cuando la fuente (en este caso el blanco) y el receptor (el equipo de radar) están en movimiento uno respecto al otro. A partir del corrimiento Doppler, tales radares deducen la velocidad con que el objeto se está acercando a la antena o alejándose de la misma.

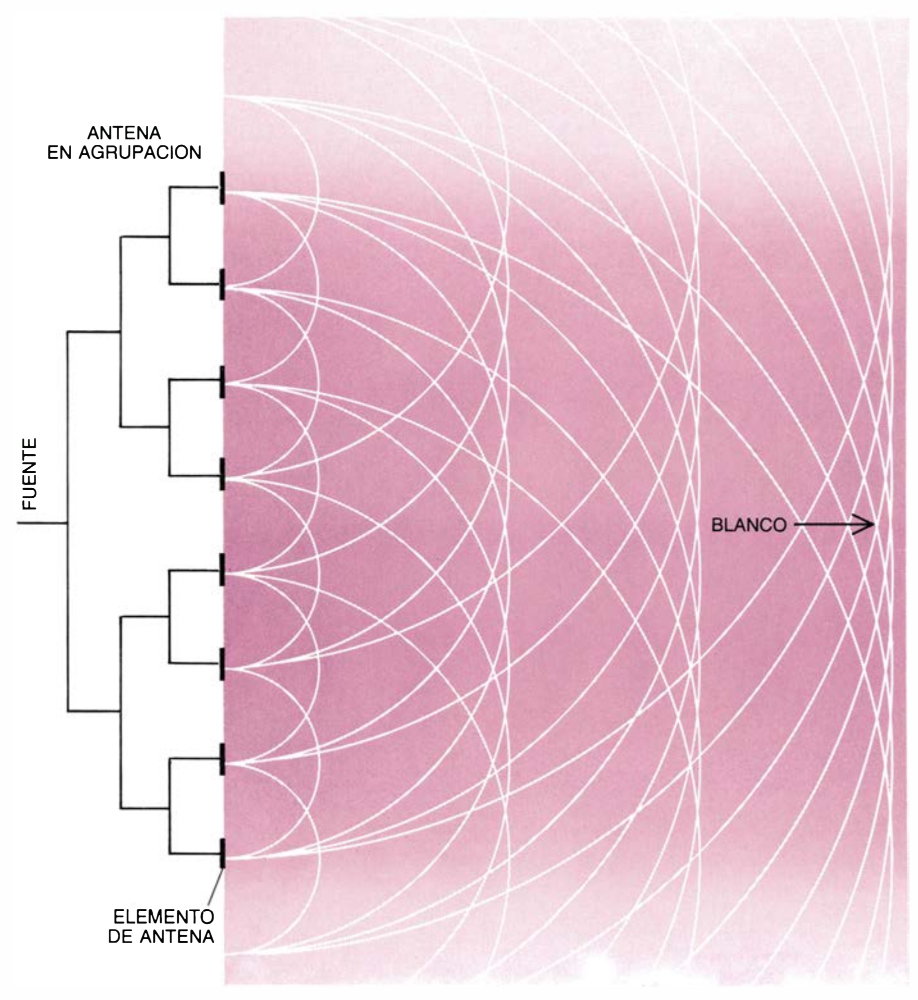
Para una distancia dada, la intensidad del eco aporta alguna indicación del tamaño del objeto. Usamos “indicación” con un propósito deliberado: dos objetos del mismo tamaño, si tienen diferente forma o están construidos de distintos materiales, pueden producir ecos de intensidades notablemente diversas. Para obtener datos más precisos sobre el tamaño, algunos radares envían impulsos tan breves que son físicamente más cortos que los blancos sobre los que es probable que incidan o, por decirlo en lenguaje técnico, que “iluminen”. Si un radar emite energía durante sólo algunas milmillonésimas de segundo, la parte anterior del pulso habrá recorrido algunos decímetros cuando concluya la transmisión. Tal impulso es más corto que un avión, por ejemplo. Las señales de radar se reflejan en la parte próxima y en la lejana del objeto sobre el que inciden; en el caso de un impulso extremadamente corto, las dos reflexiones provocarán ecos diferentes. El intervalo de tiempo entre los ecos corresponde a la longitud del blanco.

Cuando un radar tradicional explora amplias zonas del firmamento, saca información de múltiples objetos. Sin embargo, es inevitable la existencia de un apreciable retraso entre observaciones sucesivas de distintos blancos. El ritmo de actualización, la velocidad a la que un radar toma nuevas lecturas de un blanco, no es superior, para la mayoría de los radares orientados mecánicamente, a la velocidad de rotación de la antena sobre su eje. En los radares de control de tráfico aéreo, por ejemplo, la línea verde radial que barre continuamente la pantalla del tubo de rayos catódicos, dejando tras de sí las posiciones actuales y otras informaciones, sobre los aviones que se encuentran dentro de su alcance, gira a la misma velocidad con que lo hace la antena parabólica. La velocidad de actualización de tales radares se establece en una vez cada seis segundos; en prototipos militares muy avanzados raramente se alcanzan velocidades de actualización de dos veces por segundo.

A veces se precisan lecturas más frecuentes de la posición y movimiento de los blancos. Un radar solitario que se oriente mecánicamente sólo aportará datos continuos acerca de uno o varios objetos, no muchos, próximos entre sí; los seguirá, girando, para acompasarse a su movimiento. Ahora bien, en aplicaciones militares y de espionaje –verbigracia: seguimiento, por radar instalado a bordo de un buque, de misiles en ataque desde diferentes direcciones, o la comprobación pormenorizada de cierto número de componentes de carga separados en la prueba de un misil balístico intercontinental– hay que vigilar continuamente cada blanco, aunque sean numerosos. Hasta hace poco, ese objetivo podían cubrirlo sólo grupos de radares, asignado cada uno al seguimiento de su blanco respectivo. Hoy un radar de barrido electrónico realiza lo que antes demandaba una



1. PAR DE AGRUPACIONES que constituyen el radar en forma de cara de Jano que las Fuerzas Aéreas poseen en la Base Otis en Cabo Cod (*arriba*). Conocido como PAVE PAWS y construido por la compañía Raytheon, la instalación está proyectada para suministrar información precoz relativa a los ataques con misiles balísticos lanzados desde submarinos y para ayudar en el seguimiento de satélites en órbita. Distínguese de las antenas orientables de los radares corrientes porque en la antena de PAVE PAWS no hay ninguna parte móvil. Sus haces se orientan electrónicamente por interferencia de las señales separadas emitidas por los 1792 elementos radiantes que posee cada una de las caras de 30 metros de lado. Estas antenas dobles, que forman entre sí un ángulo de 120 grados, capaz cada una de explorar 120 grados de azimut, se combinan para conferir al radar un campo de visión de 240 grados, esbozado en la imagen de la pantalla sintetizada mediante ordenador (*fotografía de la izquierda*). Dentro de ese ángulo, sigue un gran número de objetos casi simultáneamente, dirigiendo electrónicamente su haz de un blanco a otro en algunas millonésimas de segundo. A su alcance máximo de 5500 kilómetros, la instalación PAVE PAWS detecta objetos con una superficie frontal de 10 metros cuadrados. El pincel de luz permite al operador pedir datos acerca de los blancos que se vean en la pantalla y alterar la información en los archivos.



2. ELEMENTOS DE ANTENA EN UNA AGRUPACION: emiten, por separado, señales de microondas. Cuando todos los elementos radian en fase, dando crestas de onda que se mueven hacia delante al unísono, las ondas se superponen a lo largo del eje perpendicular a la agrupación. Interfieren constructivamente para producir una intensa señal suma; origina un haz que apunta directamente hacia adelante.

batería de radares orientados mecánicamente. Por dar un ejemplo, COBRA DANE, un radar de barrido electrónico que observa las pruebas de misiles balísticos soviéticos desde las orillas del mar de Bering, puede seguir cientos de blancos distribuidos en un volumen de 120 grados de azimut por 80 de elevación. Los vigila a la vez, redirigiendo electrónicamente su haz de blanco a blanco en cuestión de microsegundos (millonésimas de segundo).

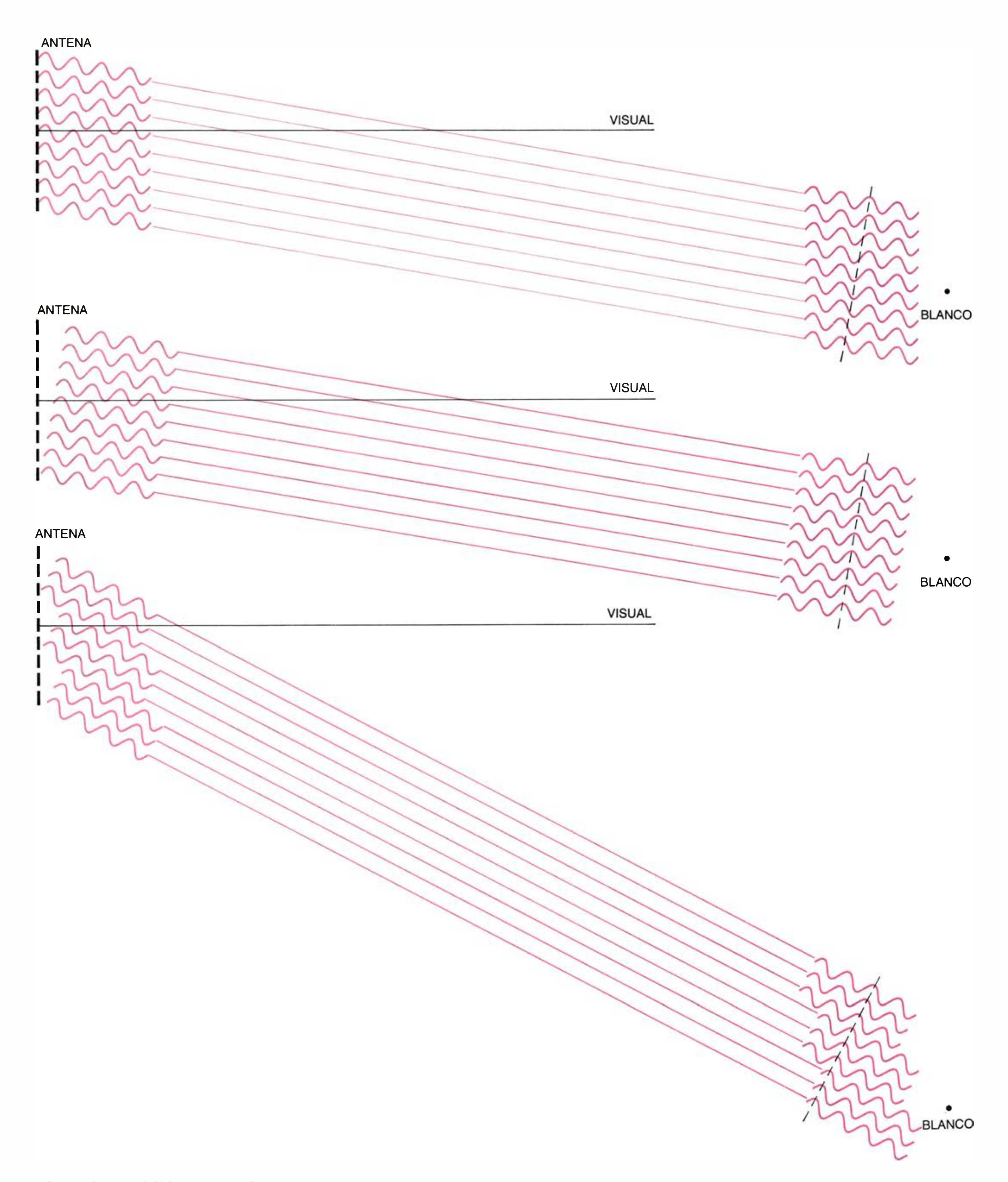
El sistema electrónico de guía que posee tan notables propiedades se funda en un sencillo principio físico. Cuando fuentes adyacentes radian energía simultáneamente a la misma frecuencia, las ondas resultantes interfieren. Cuando se superponen dos configuraciones ondulatorias procedentes de fuentes distintas, su fase relativa, que mide la relación entre sus formas de onda, determina de qué modo interaccionarán. Si las crestas coinciden y lo hacen los valles, ambas configuraciones se combinarán y producirán una señal de suma reforzada, fenómeno conocido por interferencia constructiva. Si las dos ondas no están en fase, ni coinciden crestas y valles, se producirá la interferencia destructiva: las dos señales engendrarán una suma debilitada o se anularán completamente entre sí.

La agrupación en fase está constituida por una distribución plana y regular de elementos radiantes; cada uno emite una señal de microondas de igual amplitud y en fase con la radiada por los demás. Un oscilador central genera la señal; transistores o tubos de microondas especiales, tales como tubos de onda viajera, la amplifican. Si todas las señales abandonan la distribución en fase, sus respectivas fases se sumarán en cualquier punto a lo largo de una línea perpendicular a la cara de distribución. La señal será, pues, intensa, capaz de producir ecos detectables de los objetos que se hallen en su camino, a lo largo de la visual del radar, o eje perpendicular a la cara, y dentro de un pequeño ángulo a cada lado.

Para mayores ángulos con la visual, las señales procedentes de cada elemento deben recorrer diferentes distancias para alcanzar un blanco. Como resultado, sus fases relativas se alteran e interfieren destructivamente, debilitando o anulando la señal. Así, fuera del estrecho cono que tiene por eje la visual del radar, cono en cuyo interior se desarrolla la interferencia constructiva, los objetos no producen ecos detectables. Debido a la naturaleza del fenómeno de la interferencia, la anchura de tal cono es directamente proporcional a la longitud de onda a que se opera e inversamente proporcional al tamaño de la distribución radárica. Con cada elemento radiando en fase, el haz se va guiando a lo largo de la visual.

Supongamos ahora que las señales procedentes de cada uno de los elementos radiantes se retrasan electrónicamente en cuantía creciente a lo largo de la cara de la agrupación. Cada retraso determina que una señal quede desfasada una fracción de longitud de onda con respecto a la señal del elemento adyacente. Y, con ello, se modifica la fase relativa de las señales. La zona en donde las distintas señales suman ahora sus fases para producir una fuerte señal resultante, capaz de detectar los blancos, no queda directamente delante, a lo largo de la visual de la antena; cae a un lado de la misma, en la dirección creciente del retraso de fase. El ángulo del haz depende de tres valores: magnitud de la variación de fase, tamaño de la distribución y longitud de onda de las señales. De nuevo, el haz toma la forma de un estrecho cono rodeado de regiones de interferencia destructiva. Se ha desviado el haz del radar sin movimiento físico de la antena.

Cuando el eco retorna de un blanco que se encuentra a lo largo de esta nueva visual electrónica, creada por los progresivos retrasos de fase, el conjunto de circuitos que produjeron el retraso de las señales transmitidas introduce, ahora, un nuevo conjunto de retrasos en las distintas señales recibidas por cada elemento radiante. Cuando el frente de onda que retorna barre oblicuamente la cara de la distribución, los elementos que fueron los últimos en transmitir –es decir, los más próximos al blanco– son los primeros en recibir el impulso reflejado. Por tanto, el mismo conjunto de retrasos que sirvió para orientar el impulso transmitido pone ahora todas las señales constituyentes del eco en fase, listas para el proceso que extrae información relativa al blanco.



3. LA ORIENTACION ELECTRONICA DEL HAZ requiere corrimientos progresivos en la fase de la señal. Radiando en fase, cada elemento de la antena emite una señal que se propaga en todas las direcciones. Al alejarse de la visual de la agrupación, o eje perpendicular, las crestas y valles de las señales no coinciden (*arriba*). En esta dirección, las señales no están en fase; el pulso emitido por el radar se debilita, pues, por medio de la interferencia destructiva y no produce eco detectable procedente del objeto. Para orientar la región de interferencia constructiva hacia el objeto, lo que equivale a orientar el haz, las distintas señales se emiten con retrasos de una fracción de longitud de onda. Resulta una serie de corrimientos de fase que crece a lo largo de la cara de la agrupación. Las señales así orientadas por variación de la fase coinciden ahora a cierto ángulo respecto al eje (*centro*), interfiriendo constructivamente para producir una señal intensa. Para desviar más el haz, se sube el incremento entre los sucesivos corrimientos de fase. Para reducir los circuitos necesarios, los retrasos nunca llegan a una longitud de onda completa; antes bien, se inyectan aumentos discretos, desde retraso nulo hasta un máximo corrimiento de fase inferior a una longitud de onda, repetidamente, a lo largo de la cara de la agrupación (*esquema inferior*). El resultado es un haz en el que las crestas de las señales coinciden para un gran ángulo respecto al eje, dando por resultado interferencia constructiva y una señal intensa.

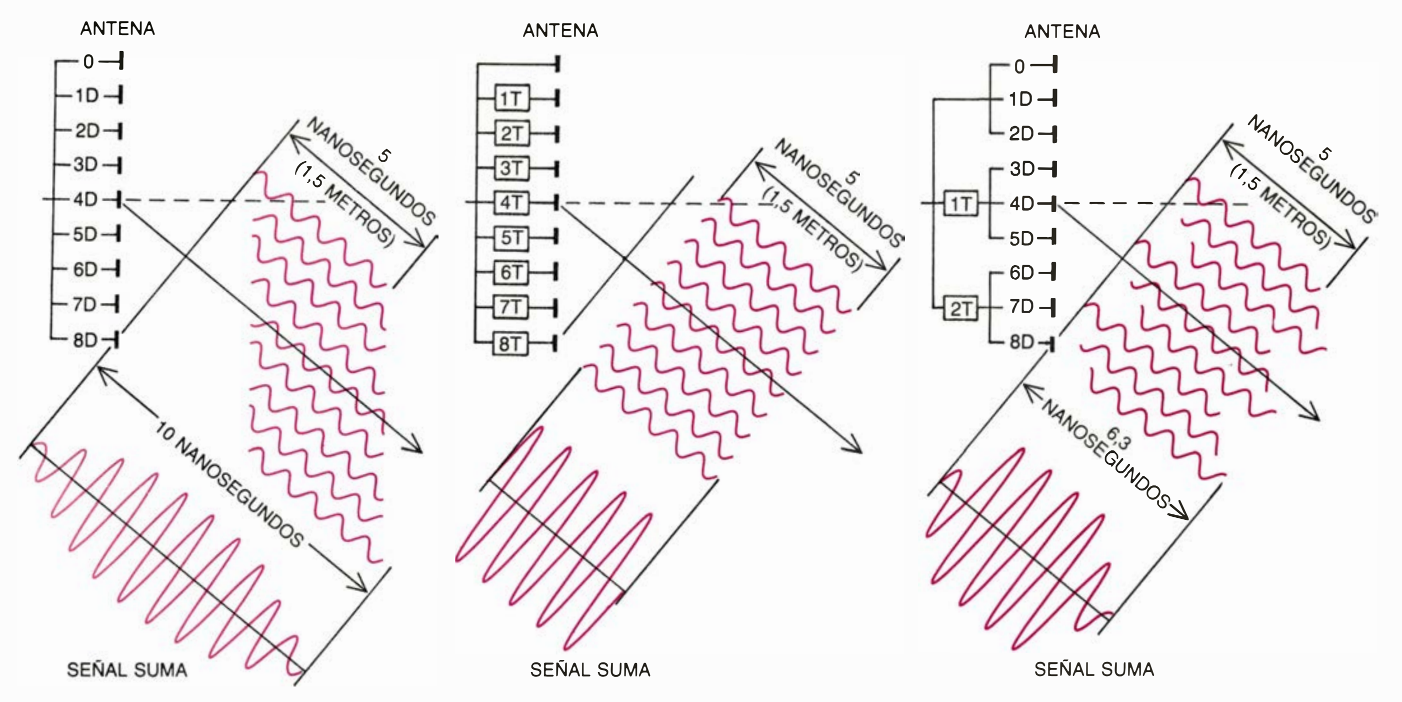
La orientación mediante retrasos de fase faculta a la distribución radárica para que desvíe su haz hasta 60 grados con respecto al eje perpendicular, dándole un campo de visión de 120 grados de anchura: es decir, una tercera parte de la totalidad del horizonte; si la cara de la distribución está suficientemente inclinada, ese campo llega desde el horizonte hasta bastante más allá del cenit. Como la orientación del haz no lleva consigo ajustes mecánicos, en mover el haz de un extremo a otro de su recorrido sólo se tardan microsegundos. Con un ordenador que calcule los retrasos de fase apropiados para cada orientación deseada del haz y que gobierne los circuitos encargados de producir los retrasos, un radar de control en fase del estilo de COBRA DANE puede seguir varios cientos de blancos simultáneamente.

Por cambiador de fase se conoce el dispositivo electrónico crucial para la orientación mediante retraso de fase: crea el retraso apropiado en la señal de microonda que se inyecta a cada elemento. El cambiador de fase consta de cables o guías de ondas de tamaños precisos. ¿Cómo funciona? El aumento de la longitud del cable por donde viajará una señal para ir del oscilador o amplificador al elemento radiante introduce un retraso en la transmisión de la señal. En la práctica, es imposible lograr que la longitud de cable que alimenta a cada elemento radiante de un radar de barrido electrónico varíe infinitésimamente y se produzcan retrasos de fase asimismo de variación continua. Por contra, el cambio de fase tiene lugar a pasos discretos. Una jerarquía de cables, cada uno de distinta longitud, va unida a cada elemento. Para alcanzar los cambios de fase adecuados para la desviación deseada del haz, se inserta en el circuito una cierta combinación particular de dichos cables.

Por ejemplo, el radar de espionaje COBRA DANE usa cambiadores de fase de tres bits, es decir, cambiadores de fase con tres longitudes. Cada cambiador contiene tres longitudes de línea, guía de ondas que canaliza la energía de las microondas a lo largo de una delgada tira de cobre centrada entre dos placas de cobre conectadas a tierra. Una de las líneas triplaca, que así se llaman, añade media longitud de onda al camino de la señal, unos quince centímetros para la frecuencia a que opera COBRA DANE, cercana a un gigahertz (mil millones de ciclos por segundo). Introduce así un corrimiento de fase de 180 grados con respecto a la señal intacta. Otra línea triplaca retrasa la señal un cuarto de longitud de onda, lo que corresponde a un corrimiento de fase de 90 grados; el tercero equivale a un octavo de longitud de onda, o un corrimiento de fase de 45 grados. En combinación, las tres líneas en tira alteran la fase de una señal en múltiplos de 45 grados, desde cero hasta 315 grados.

Las variaciones de fase a pasos parecen implicar puntos ciegos. ¿Cómo pueden ocho retrasos de fase, a intervalos de 45 grados, dar por resultado un haz de radar continuamente orientable? La respuesta tiene que ver con las características de las configuraciones de interferencia. Cada vez que la diferencia de fase entre las señales radiadas desde lados opuestos de la distribución aumenta en 360 grados, una longitud de onda, la región de interferencia constructiva que constituye el haz se traslada en su misma anchura, aproximadamente. Para mover el haz perpendicular, que aparece cuando todas las señales están en fase, hasta una posición contigua sin dejar puntos ciegos intermedios, el corrimiento total de fase de un lado a otro de la agrupación debe ser de unos 360 grados.

Carece, pues, de interés si los corrimientos de fase aumentan sin cesar de uno a otro lado de la distribución, o si

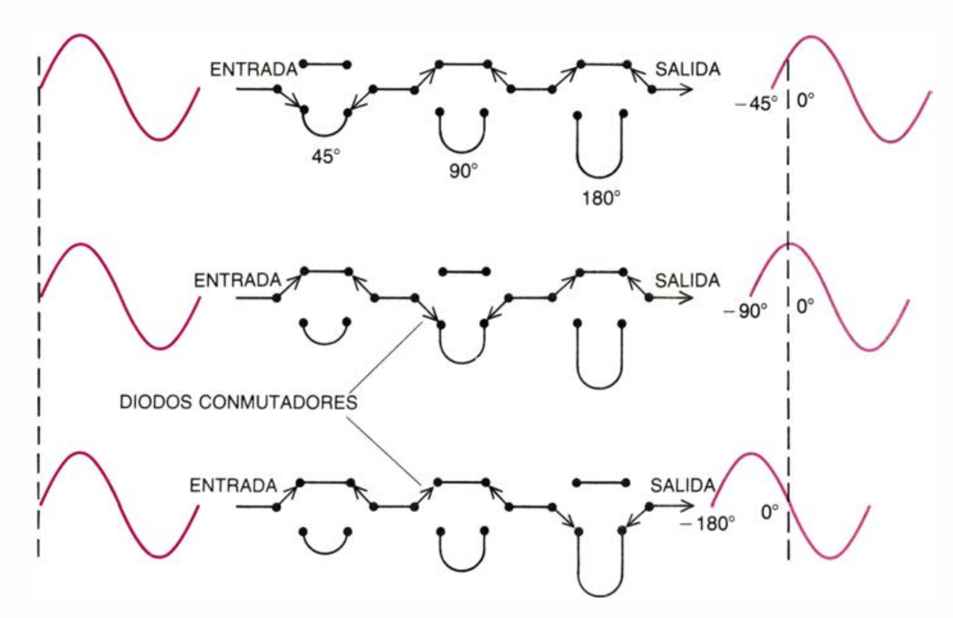


4. RETRASOS TEMPORALES para evitar que un pulso de radar muy breve, necesario cuando se trata de determinar el tamaño de un objeto, se alargue y deforme mientras se transmite formando un ángulo grande con respecto al eje de la agrupación. Un pulso de cinco nanosegundos (cinco milmillonésimas de segundo) mide alrededor de 1,5 metros desde el principio hasta el final cuando se dirige hacia delante, pero cuando se desvía fuertemente mediante corrimientos de fase, representados por múltiplos de *D* (los retrasos de fase en las ondas individuales se omiten en el esquema por razones de claridad), puede alargarse hasta varias veces esa longitud (*ilustración de la izquierda*). La forma y dimensión del pulso se preservan mediante retrasos progresivos en tiempo, representados por múltiplos de *T* en cuantía de varias veces de los retrasos usados para orientar mediante fase (*centro*). Al objeto de evitar la complejidad de los circuitos individuales dedicados a introducir retrasos de tiempo en cada elemento de antena (de los cientos de miles que ésta tiene), muchas agrupaciones se dividen en subconjuntos, orientado cada uno mediante corrimientos de fase. Para grandes ángulos, los subconjuntos producen señales distorsionadas, pero se coordinan mediante retrasos en tiempo, de suerte que las distorsiones no se sumen de un lado a otro de la cara de la agrupación. Las dimensiones del pulso se conservan con bastante exactitud y se requieren menos circuitos para producir retrasos en tiempo (*derecha*).

lo hacen en pasos de 45 grados; incrementos mayores darían por resultado una ligera caída de la intensidad del haz y de la sensibilidad de la antena. Para conseguir una orientación más fina, una antena dotada de cambiadores de fase de tres bits puede usar cambios de fase total más pequeños; por ejemplo, 180 grados en cuatro pasos de 45.

Si la desviación del haz ha de ser superior a su propia anchura con respecto a la perpendicular, la variación total de fase de uno a otro lado de la cara que contienen los elementos ha de superar los 360 grados. A causa del carácter periódico de las ondas electromagnéticas, una variación de fase de varias longitudes de onda equivale a un corrimiento de 360 grados. Para que la variación total de fase sea superior a 360 grados, el aumento lineal del retraso de fase desde 0 a 360 grados debe repetirse cierto número de veces a lo largo de la cara que soporta los elementos de antena. La primera serie de retrasos de fase altera ésta en un total de una longitud de onda; la segunda la aumenta desde una longitud de onda a dos, y así sucesivamente. La gráfica del retraso de fase en función de la distancia sobre la cara se asemejará a una serie de dientes de sierra; cuanto más agudos sean y mayor su número, tanto más marcada será la desviación del haz.

Una sencilla construcción geométrica muestra que el área eficaz de la antena disminuye cuando aumenta el ángulo del haz con la perpendicular. En virtud de lo cual, la sensibilidad, de una distribución gobernada por fase, a los ecos que regresan del blanco cae rápidamente cuando se llega a ángulos superiores a 60 grados con respecto a la perpendicular a la agrupación. Por sí mismo, el conjunto de antenas gobernado por fase no puede compararse con la parábola orientada mecánicamente en cuanto a capacidad de explorar el horizonte en todas las direcciones. Una solución sería unir cierto número de agrupaciones orientadas en distintas direcciones. Otro medio de aumentar la cobertura de una distribución gobernada por fase consiste en montarla horizontalmente bajo una lente en forma de cúpula que refracte el haz, disposición que aumenta su desviación angular. Cuando la distribución produce un haz orientado a 60 grados respecto al cenit, la lente lo desvía aún más, hasta que emerge en ángulo recto, directo hacia el horizonte. Así, la lente confiere a la distribución la capacidad de vigilar el hemisferio celeste entero. Lente que puede fabricarse de plástico o cerámica especial que refracten las microondas; y puede adquirir la forma de un segundo grupo de cambiadores de fase, preparado para introducir retrasos de fase adicionales en las señales que reciben de la distribución.



5. EL CAMBIADOR DE FASE GUIA LA SEÑAL DE MICROONDA que se ha suministrado a cada elemento de antena a través de cables de longitud variable. Los cables retrasan la señal, con lo que alteran la fase relativa de la información de salida. Puesto que las microondas, igual que toda la radiación electromagnética, se mueven a velocidad constante, el retraso que crea cada vía es proporcional a su longitud. La ilustración muestra los tres retrasos básicos que cada cambiador de fase puede introducir. La más corta de las tres vías origina un retraso de fase de 45 grados, o un octavo de longitud de onda (*arriba*). Si no se toma esta vía y se conecta la siguiente guía de ondas, el corrimiento de fase es de 90 grados, o un cuarto de la longitud de onda (*esquema del centro*). La más larga de las tres vías proporciona un retraso de fase de 180 grados, o media longitud de onda (*abajo*). Mediante combinaciones de las distintas vías se pueden producir corrimientos de fase, en incrementos de 45 grados, hasta 315 grados. Para cada ángulo de orientación del haz del radar, el ordenador central calcula el retraso de fase correcto de cada elemento radiante y conecta la combinación apropiada de vías en el cambiador de fase.

Cuando se usa la orientación gobernada por fase para dirigir un breve impulso de energía de un radar formando un gran ángulo respecto a la perpendicular a la distribución, el impulso que emerge está inevitablemente distorsionado, alargado en tiempo y espacio. Supóngase que una antena transmite un pulso que dura cinco nanosegundos (cinco milmillonésimas de segundo). Si el radar está orientado hacia delante, el impulso que sale de la antena tiene una sección rectangular, cuya anchura iguala la propia de la distribución y cuya longitud es la distancia que las ondas electromagnéticas recorren en cinco nanosegundos, metro y medio aproximadamente. Pero si el haz se ha desviado bastante de la perpendicular por corrimientos de fase, el impulso tomará la forma de un paralelogramo. Desde la perspectiva del blanco, la longitud del impulso será superior a metro y medio, ya que las señales componentes no incidirán simultáneamente: lo harán en secuencia. El eco reflejado se habrá alargado también.

Para detectar y seguir blancos, un radar emite habitualmente pulsos mucho más largos –de 1000 nanosegundos de duración, por ejemplo–; una distorsión de nanosegundos tiene, pues, escasa influencia. El alargamiento apenas afecta a la capacidad del radar para recoger del eco información acerca de la posición y velocidad. Sin embargo, cuando se trata de resolver objetos que viajan en formación cerrada es preciso emitir pulsos breves. Un pulso breve reviste, asimismo, una importancia crucial en radares proyectados para estimar el tamaño de un blanco a partir de las distintas reflexiones que retornan de sus superficies anterior y posterior cuando se le ilumina mediante un pulso extremadamente corto. Si un pulso breve se alarga lo suficiente por distorsión, los ecos que habrían de aparecer nítidos se mezclan ahora y enmascaran la información.

Esta dificultad se supera mediante un proceso, similar al retraso de fase, que preserva la forma del impulso. En la orientación mediante la fase, es necesario retrasar las señales solamente en una fracción de la longitud de onda; los retrasos precisos para evitar el alargamiento del impulso equivalen a varias longitudes de onda. De hecho, las señales individuales se hacen partir a intervalos de tiempo proporcionales a

sus distancias al blanco; el efecto es el mismo que si la agrupación se hiciese girar para colocar el blanco en su perpendicular. A este proceso se le denomina orientación por retraso en tiempo; lo mismo que los retrasos incrementales de fase, da una señal en el ángulo de orientación deseado, que es coherente y, por tanto, intensa.

Tales retrasos largos, equivalentes a bastantes metros de recorrido de la señal, requieren que distintos tramos de cable se incorporen al camino, que la señal sigue desde el oscilador o el amplificador al elemento radiante, en proporciones adecuadas. Una antena de radar de barrido electrónico de tamaño grande puede incluir muchos miles de elementos radiantes; si cada uno de ellos incorporase circuitos para retrasos temporales, el resultado sería una instalación de radar enormemente compleja y cara. Los proyectistas de radar, en cambio, optan por un compromiso entre una justa preservación de la forma del pulso y la sencillez constructiva. Se llega así a una agrupación orientada, al mismo tiempo, por corrimientos de fase y retrasos en el instante de emisión.

En el COBRA DANE, por ejemplo, cada uno de los 15.360 elementos radiantes está unido a un cambiador de fase de tres bits; de aquí que cada señal experimente individualmente su corrimiento de fase. En la búsqueda de blancos, el radar transmite impulsos de 1000 nanosegundos; se orienta sólo mediante corrimientos de fase. Como el objeto del radar es vigilar las pruebas de misiles balísticos soviéticos, debe recoger, sin embargo, información sobre el tamaño de un objeto, una vez localizado. Con esa finalidad, la antena está organizada en 96 subconjuntos, o bloques, de 160 elementos radiantes cada uno. Una vez que el radar ha detectado un blanco, comienza a transmitir pulsos de extrema brevedad, introduciéndose retrasos en tiempo de emisión en las señales que alimentan cada subconjunto. Los circuitos de retrasos de tiempo vienen a ser, a gran escala, lo que los cambiadores de fase en menores dimensiones: constan de cables coaxiales con cierto intervalo de longitudes prefijadas, cualquier combinación de los cuales puede conectarse al circuito para alcanzar retrasos de tiempo desde una hasta 64 longitudes de onda (unos 20 metros) a la frecuencia de operación del COBRA DANE, aproximadamente un gigahertz.

Como los subconjuntos tienen diámetros de tres metros frente a los 30 que es el de la distribución total, la distorsión que se produce en cada subconjunto cuando presentan ángulos de orientación grandes resulta moderada. Cada uno emite una señal en forma de paralelogramo; mediante la orientación en retrasos de tiempo se suman las señales, no así las distintas distorsiones. De lo que resultan dos cosas: la conservación razonable de la forma del pulso y la necesidad de usar 96 unidades de retraso en tiempo, en vez de 15.360. En lo concerniente al material, la orientación por retraso en tiempo del COBRA DANE gasta sólo unos 1600 metros de cable adicional; si por ello no fuera, habría hecho falta 150 kilómetros.

La sustitución de una antena única y móvil por un conjunto fijo de elementos radiantes ofrece otras ventajas, además de la orientación electrónica. Verbigracia, la fiabilidad. Un conjunto fijo no depende de componentes mecánicas, tales como cojinetes y motores, susceptibles de fallar. Además, la mayor parte de los radares orientados mecánicamente usan uno, o a lo más algunos, tubos de microondas muy grandes para amplificar la señal. Por citar un ejemplo, el Marconi Martello, radar de defensa aérea de fabricación británica, está construido alrededor de un único tubo con una potencia de salida de unos tres megawatt. Si el tubo falla, el sistema fracasa con él. Tales radares de defensa y espionaje pueden conectarse rápidamente a fuentes auxiliares de alimentación.

Por su parte, el COBRA DANE se alimenta con 96 tubos, que producen, cada uno, 160 kilowatt de potencia. La salida del tubo pasa por un divisor; de aquí va a los 160 elementos radiantes de un subconjunto. El fallo de un tubo en el COBRA DANE sólo incapacita, por tanto, una noventa y seisava parte de la distribución; el radar sigue en funcionamiento, aunque con capacidad un tanto limitada. Además, los tubos pequeños se sustituyen mejor que el tubo, único y enorme, del radar Martello.

Los conjuntos gobernados por fase mediante técnicas de estado sólido pueden proporcionar niveles aún más altos de fiabilidad y cómodo mantenimiento. Los radares llamados en clave PAVE PAWS, proyectados para detectar el lanzamiento de misiles balísticos desde el

6. EL CIFRADO Y COMPRESION DE PULSOS hace posible que un radar transmita un pulso largo pero obtenga una información sobre el tamaño y distancia del blanco tan exacta como cuando se usa un pulso corto. Un pulso corto requiere generalmente una potencia de emisión muy alta para un alcance adecuado, lo que lo convierte en poco práctico. En el cifrado de la señal, una muy breve que contiene cierto dominio de frecuencias se hace pasar por una línea retardadora dispersiva, en la que sus componentes sufren retrasos proporcionales a su frecuencia. En tal proceso, el pulso se alarga; por ejemplo, un pulso de cinco nanosegundos puede alargarse 200.000 veces hasta alcanzar la duración de un milisegundo. Entonces, se amplifica y transmite. El eco que retorna del blanco está también amplificado. Una línea compresora de pulsos retrasa el eco en cuantías que varían inversamente con la frecuencia, para reducir la señal a su duración original de cinco nanosegundos. El eco comprimido provee toda la información de que se habría dispuesto si se hubiera transmitido un pulso inalterado de cinco nanosegundos.

mar, instalados ya en puntos estratégicos de cabo Cod y el estado de California, y proyectados otros en Georgia y Texas, generan su potencia mediante transistores. Cuatro de 100 watt están conectados en paralelo en un módulo separado y alimentan los elementos radiantes. Así, en cada cara gemela de la antena del PAVE PAWS, el trabajo de amplificar la señal se divide entre los 1792 elementos de antena, en vez de entre los 96 tubos; ello significa que la influencia de un fallo en el funcionamiento general del radar es menor todavía. Asimismo, el tiempo medio entre dos fallos sucesivos de un módulo de estado sólido se prolonga más que el de un tubo del COBRA DANE: 100.000 horas frente a 20.000. Cuando se estropean los módulos, de 28 volt y treinta centímetros de largo, se sustituyen más fácilmente que cuando hay que hacerlo con los tubos de 40.000 volt y metro y medio de alto del COBRA DANE.

En el PAVE PAWS, igual que en muchos radares del estado sólido, la amplificación se desarrolla después que se ha dividido la señal entre los elementos de antena y se ha alterado su fase. Se eliminan así las pérdidas de potencia que se producen cuando una señal amplificada pasa por los circuitos de división y cambio de fase. Pero ese aumento de eficacia y las demás ventajas de la tecnología de estado sólido exigen un precio: en general, los circuitos de estado sólido producen potencias máximas inferiores a las que puede proporcionar un radar alimentado por tubo.

Las limitaciones en la potencia de la señal han realzado la importancia de las técnicas conocidas como cifrado de pulsos y compresión de pulsos, que capacitan a un radar para simular breves impulsos de alta potencia con la emisión de señales menos potentes durante intervalos de tiempo más largos. Esta capacidad es importante incluso para los radares de tubo de alta potencia, tanto para los de antena orientada mecánicamente como para los de agrupación gobernada por fase, en la recolección de ciertas clases de información acerca de blancos distantes.

La distancia a la que un radar de sensibilidad determinada detecta un objeto de un tamaño y reflectividad considerados depende de la energía total de un pulso. Cuanto más corto sea éste, tanto mayor deberá ser la máxima potencia transmitida, si no se quiere alterar el alcance del radar. El COBRA DANE detecta un objeto metálico del tamaño de un pomelo a una distancia de 1000 millas náuticas (1850 kilómetros); para hacerlo con un pulso de cinco nanosegundos, debe radiar una potencia máxima de tres billones de watts, potencia superior a la necesaria para destruir todos sus circuitos.

No obstante, un impulso breve es esencial si se pretende que el radar determine el tamaño de un objeto o distinga entre varios objetos volando en formación cerrada. El hecho de que el alcance no sea función de la potencia máxima, sino de la energía total del impulso, aporta una solución: alargar el impulso, reduciendo así la potencia máxima necesaria, en un proceso conocido como cifrado del pulso, y después comprimir el eco, para extraer del mismo cuanta información habría suministrado un pulso corto. En el COBRA DANE, por ejemplo, un pulso de cinco nanosegundos se alarga 200.000 veces, hasta una duración de un milisegundo, antes de amplificarlo y transmitirlo. La potencia máxima requerida queda dividida por idéntica cifra: de tres billones de watt a 15 megawatt, potencia real de COBRA DANE.

En un ejemplo típico de cifrado de pulso, uno de cinco nanosegundos, compuesto de cierto dominio de frecuencias, atraviesa una línea de retraso dispersivo, que retarda sus componentes en cuantías crecientes con la frecuencia: las frecuencias más bajas del pulso no sufren retraso, mientras que las más altas experimentan un retraso máximo de un milisegundo. A continuación el pulso, de un milisegundo de duración, se amplifica y transmite; el eco que retorna dura igual.

Este eco pasa por una red receptora y compresora, que añade un segundo grupo de retrasos. Esta vez, los retrasos siguen una relación inversa a la frecuencia. La más baja del pulso experimenta un retraso de un milisegundo, mientras que la frecuencia más alta no sufre retraso alguno. Cada componente de la señal se ha sometido, pues, al mismo retraso total (un milisegundo) mediante el cifrado de pulsos y su compresión. El resultado es un eco no distorsionado de cinco nanosegundos.

Si el impulso transmitido, de un milisegundo de duración, que medía casi trescientos kilómetros de longitud, hubiera incidido sobre un objeto sustancialmente más corto, habría retornado en forma de dos ecos superpuestos. Habitualmente no pueden separarse tales ecos; su tiempo relativo de llegada no puede usarse para determinar el tamaño del objeto. Sin embargo, cuando se comprime el eco cuyo impulso se ha cifrado, los ecos superpuestos se resuelven en forma de dos señales diferentes de cinco nanosegundos.

El cifrado de pulsos y su compresión desempeñan un papel paralelo en los radares de estado sólido. Aun cuando no haya necesidad de determinar el tamaño del objeto que refleja la señal del radar, precisar la distancia requiere un impulso razonablemente corto. Sin compresión de pulsos, uno de un milisegundo puede resolver la distancia a que se encuentra un objeto con un error de unos 130 kilómetros. Además, los pulsos largos son sensibles a reflexiones extrañas, procedentes de la precipitación y del suelo. Con todo, las altas potencias necesarias para un alcance adecuado con pulsos de duraciones más cortas están fuera de las posibilidades de muchos radares de estado sólido. El cifrado y la compresión de impulsos capacitan a dichos radares para reconciliar el alcance y la resolución con la baja potencia.

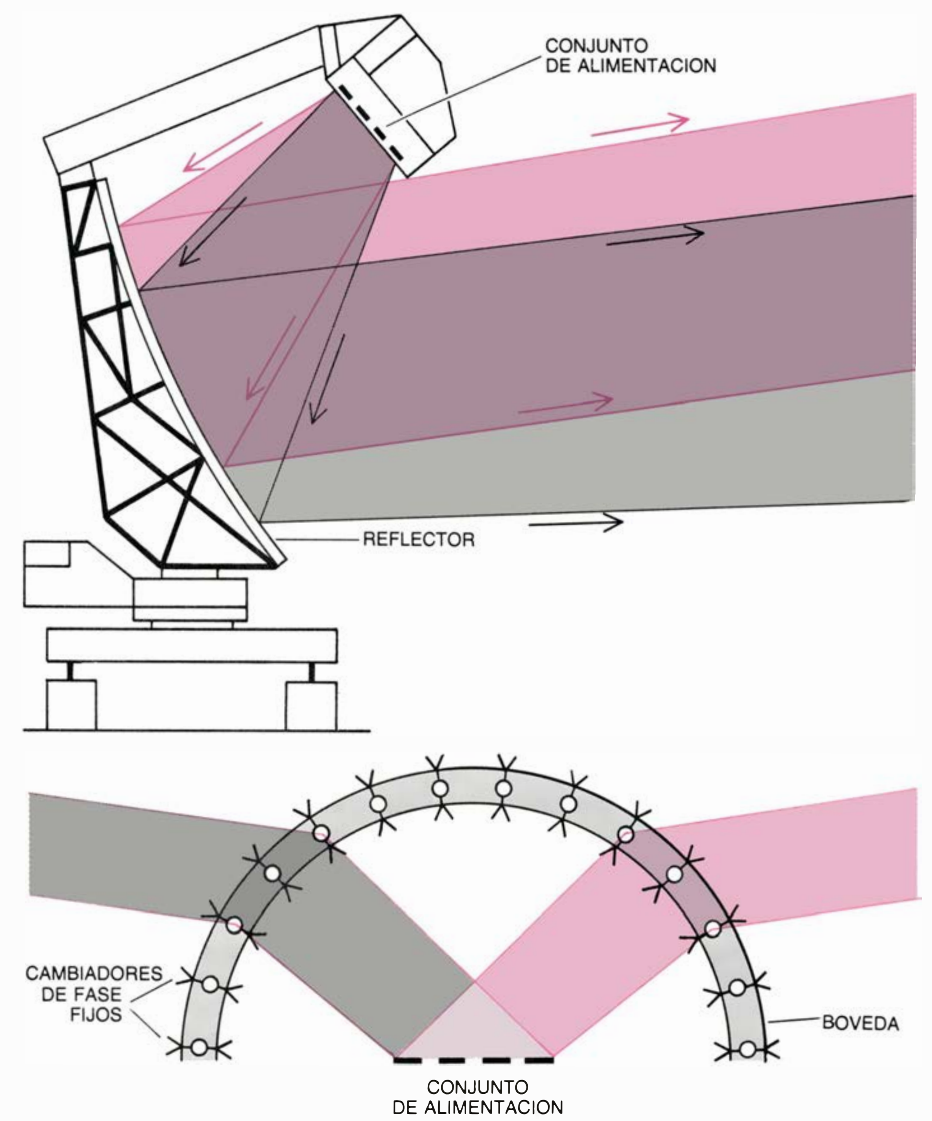
Los primeros radares de barrido electrónico que se instalaron datan de los años sesenta y setenta y cumplen objetivos militares y de espionaje. Hay circunstancias en el mundo civil en las cuales aparecen las mismas exigencias que estimularon el desarrollo de la tecnología militar: la necesidad de obtener datos frecuentes acerca de objetos que se mueven con rapidez. Un ejemplo se da en las cercanías del extremo de las pistas de aterrizaje de los aeropuertos, donde los aviones que arriban guardan turno para la aproximación final. Allí, los radares de aproximación precisa transmiten pulsos a los aviones que entran, siguiendo simultáneamente sus distancias y posiciones en relación con el extremo de la pista, guiándolos hasta la misma. Tales radares usan ya la tecnología de barrido electrónico.

Con un menor número de elementos radiantes, el coste de un radar de esta clase disminuye. Para la mayoría de los usos, el número de elementos es necesariamente alto. Una pequeña agrupación transmite un haz menos focalizado y consiguientemente más ancho. Este factor reduce la resolución angular de la agrupación, y una superficie de antena pequeña reduce la sensibilidad de la agrupación a los ecos. Cuando no es necesario explorar una superficie amplia de cielo, ambos inconvenientes de las pequeñas distribuciones pueden evitarse combinando la distribución con un gran reflector.

No se requieren grandes dimensiones para el campo de visión de un radar de aproximación precisa. Por lo común, explora unos 10 grados de azimut y de siete a 14 de elevación. En consecuencia, sirve un híbrido de la agrupación con barrido electrónico y del tradicio-

nal reflector. En cierto diseño, se combina una distribución de 443 elementos radiantes con un disco reflector que mide 4,5 por 3,5 metros. La distribución está situada cerca del foco de la parábola, que refleja el haz a cualquier ángulo de orientación. En tal proceso, el reflector actúa de lente, focalizando el haz mientras reduce su dispersión angular. Los haces reflejados son más delgados y quedan confinados dentro de un ángulo sólido menor. En cuya virtud la capacidad de la distribución para distinguir dos blancos situados a pequeña distancia angular mejora, así como su posibilidad de determinar la orientación precisa de un blanco único. La parábola aumenta también la sensibilidad del radar a los ecos.

Los futuros radares de barrido electrónico reflejarán los adelantos obtenidos en la tecnología de circuitos. La introducción en la ingeniería del radar del equivalente a los circuitos digitales integrados reducirá considerablemente el número y tamaño de los componentes necesarios para generar, recibir y procesar la señal. Conocida como sistema de circuitos de microondas monolítico e integrado (MMIC), esta nueva tecnología reúne los cambiadores de fase, circuitos de conexión y amplificadores transistorizados en pastillas (*chips*) de arseniuro de galio. Un módulo transceptor (transmisor/receptor) completo, con todos los circuitos necesarios para un único elemento radiante de una agrupación gobernada en fase se puede montar, ya en este momento, con no más de 11 pastillas MMIC. Los módulos transceptores de estado sólido en uso requieren cientos de componentes.



7. RADARES HIBRIDOS. Combinan la agrupación en fase con una lente que altera las características del haz. En una agrupación en fase de exploración limitada (*esquema superior*), diseño que va abriéndose paso en los radares de acercamiento de los aeropuertos, una pequeña agrupación que produce un haz relativamente ancho emite su energía hacia un reflector hiperbólico. El haz se ha dibujado con dos ángulos de desviación distintos para mostrar cómo los focaliza el reflector, reduciendo la dispersión y la desviación angular. El reflector aumenta, pues, la resolución angular de la agrupación y estrecha el campo de visión. Este dispositivo permite usar una agrupación pequeña, más barata, en circunstancias que no exijan un ángulo de exploración grande. Una lente abovedada que cubra una agrupación horizontal de cierto radar militar experimental (*esquema inferior*) producirá el efecto antagónico; es decir, aumentará la desviación del haz. La lente se fabrica de una cerámica especial de materiales plásticos, que refractan las microondas; o bien se trata de una configuración en cúpula de cambiadores de fase que añaden incrementos fijos de retraso de fase al haz procedente de la agrupación de la alimentación, intensificando la desviación necesaria. Tal radar explora en cualquier dirección, del horizonte al cenit.

En último término, tal módulo puede también incluir un microprocesador que controlará el corrimiento de fase, calculando el retraso de fase adecuado cuando un ordenador central especifique la elevación y el azimut del blanco. En las actuales agrupaciones gobernadas en fase, tal función reside en el ordenador central, que calcula secuencialmente las variaciones de fase para los miles de elementos radiantes. El cálculo y control del corrimiento de fase en los distintos elementos eliminará los miles de cables usados para llevar a cabo las órdenes de variación de fase procedentes del ordenador en cada uno de los elementos individuales de la antena. Con los avances de la tecnología de circuitos, el mismo proceso de variación de fase puede convertirse en un proceso digital, realizado como una operación matemática sobre la señal en forma digital. Tal progreso permitiría alterar a voluntad la anchura del haz: ensancharlo para explorar grandes zonas de cielo o focalizarlo para el seguimiento preciso. Mientras tanto, semejante procesado digital del eco ayudaría a eliminar la interferencia por señales de bloqueo.

La creciente simplicidad y compacidad, con las concomitantes reducciones en peso y la mayor fiabilidad, adecuará pronto a los radares de barrido electrónico para su funcionamiento en el espacio. Agrupaciones de esta clase en órbita podrían servir para cartografiar la superficie terrestre, vigilar el tráfico marítimo y los témpanos de hielo, así como realizar funciones militares y de vigilancia. La próxima generación de radares cartográficos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), que se llevarán a bordo del transbordador espacial, será de barrido electrónico. La propia Marina y las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos están considerando el lanzamiento de un radar de esta clase a bordo de un satélite. Muchos de los radares enviados hasta ahora no podían orientarse; exploraban solamente una estrecha banda en el curso de cada órbita. La rápida orientación de un radar de agrupación gobernado en fase, en cambio, pondrá anchas fajas de superficie terrestre dentro del dominio de su haz.

Sustitución funcional del oído

Las prótesis implantables diseñadas para transferir estímulos eléctricos al nervio auditivo abren las esperanzas de quienes sufren un tipo de sordera derivada de la lesión de las células sensoriales que aloja el oído interno

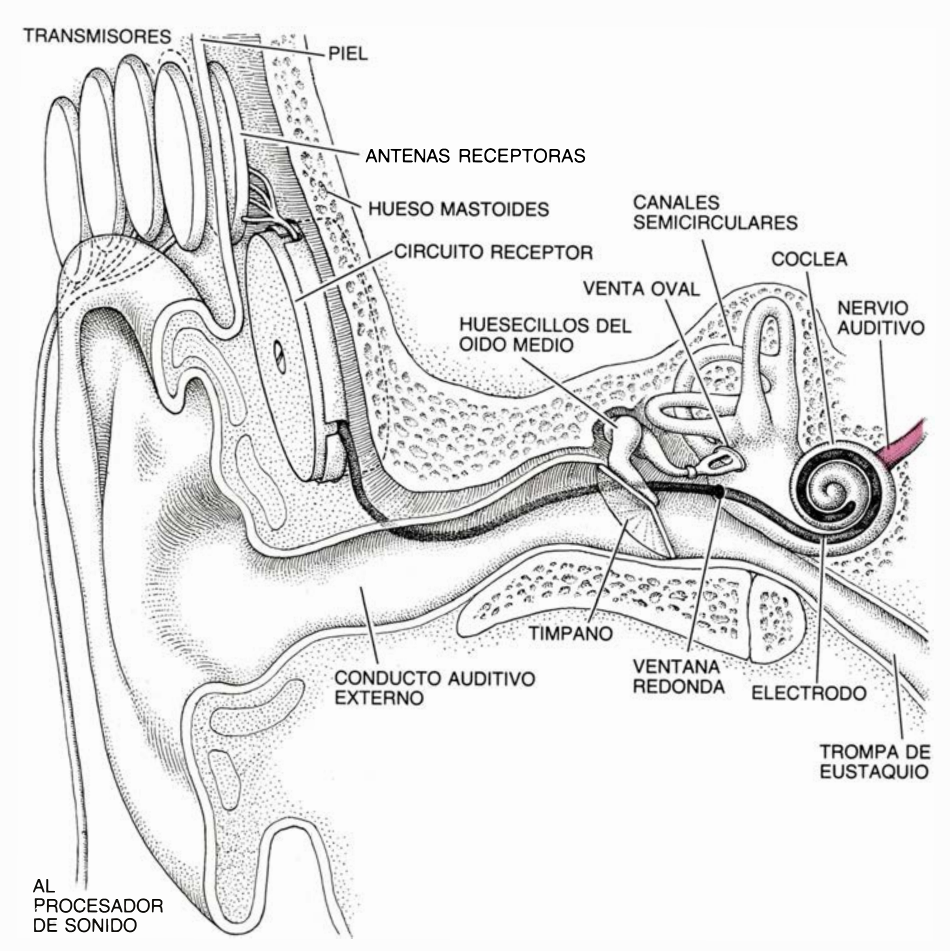
Gerald E. Loeb

Los recientes avances en el campo de la electrónica y neurofisiología han conducido a la aparición del nuevo campo del dominio neural. Esta disciplina experimental se apoya en el intercambio de información entre un circuito electrónico y un sistema nervioso con el fin de estudiar o suplir una función biológica. Uno de los principales objetivos de tal investigación es el desarrollo de aparatos protésicos que remplacen partes defectuosas del sistema nervioso humano. Gran parte del progreso en esta área es el resultado de una colaboración a largo plazo entre equipos de científicos dedicados a la investigación, tanto básica como aplicada, bajo la égida del programa de prótesis nerviosas del Instituto Nacional de Trastornos y Fallos Neurológicos y de la Comunicación. Mi propio trabajo, en la sustitución funcional del oído humano, se ha realizado, como parte de tal proyecto, con un equipo de la Universidad de California en San Francisco.

El implante coclear, la prótesis nerviosa sobre la que versa este artículo, se ha ideado para pacientes con sordera neurosensorial. En tales pacientes está dañada la función de las células ciliadas sensoriales de la cóclea, la estructura en forma de caracol que se halla en el núcleo del oído interno. En la audición normal, el sonido se propaga a través del conducto auditivo externo hacia la membrana timpánica, o tambor del oído, que transmite las vibraciones del aire a un sistema de pequeños huesecillos del oído medio. El más interno de ellos, el estribo, establece contacto con la ventana oval, abertura cubierta por la platina estapedial que se abre en la base de la cóclea y transmite la vibración al líquido que llena el interior de la cóclea, donde la perciben las células ciliadas del órgano de Corti. Las células ciliadas están ordenadas en cuatro grandes hileras en la membrana basilar, tabicamiento flexible del fondo del órgano de Corti, que separa dos de los tres conductos espirales paralelos de la cóclea. Las células ciliadas convierten la vibración de la membrana basilar en una señal eléctrica, que viaja a lo largo del nervio auditivo hasta el cerebro.

Se han diseñado varias clases de implantes cocleares para soslayar, en pacientes con sordera neurosensorial, este proceso tan elaborado de transmisión. Todos los aparatos tienen cuatro características en común: un micrófono para captar el sonido, un procesador microelectrónico que convierte el sonido en señales eléctricas, un sistema de transmisión que lleva las señales a los componentes implantados y un largo y sutil electrodo que el cirujano desliza en el seno de la cóclea para que el dispositivo suministre los estímulos eléctricos directamente a las fibras del nervio auditivo, en uno o más lugares.

Uno de esos aparatos, relativamente primitivo y de un solo canal, acaba de

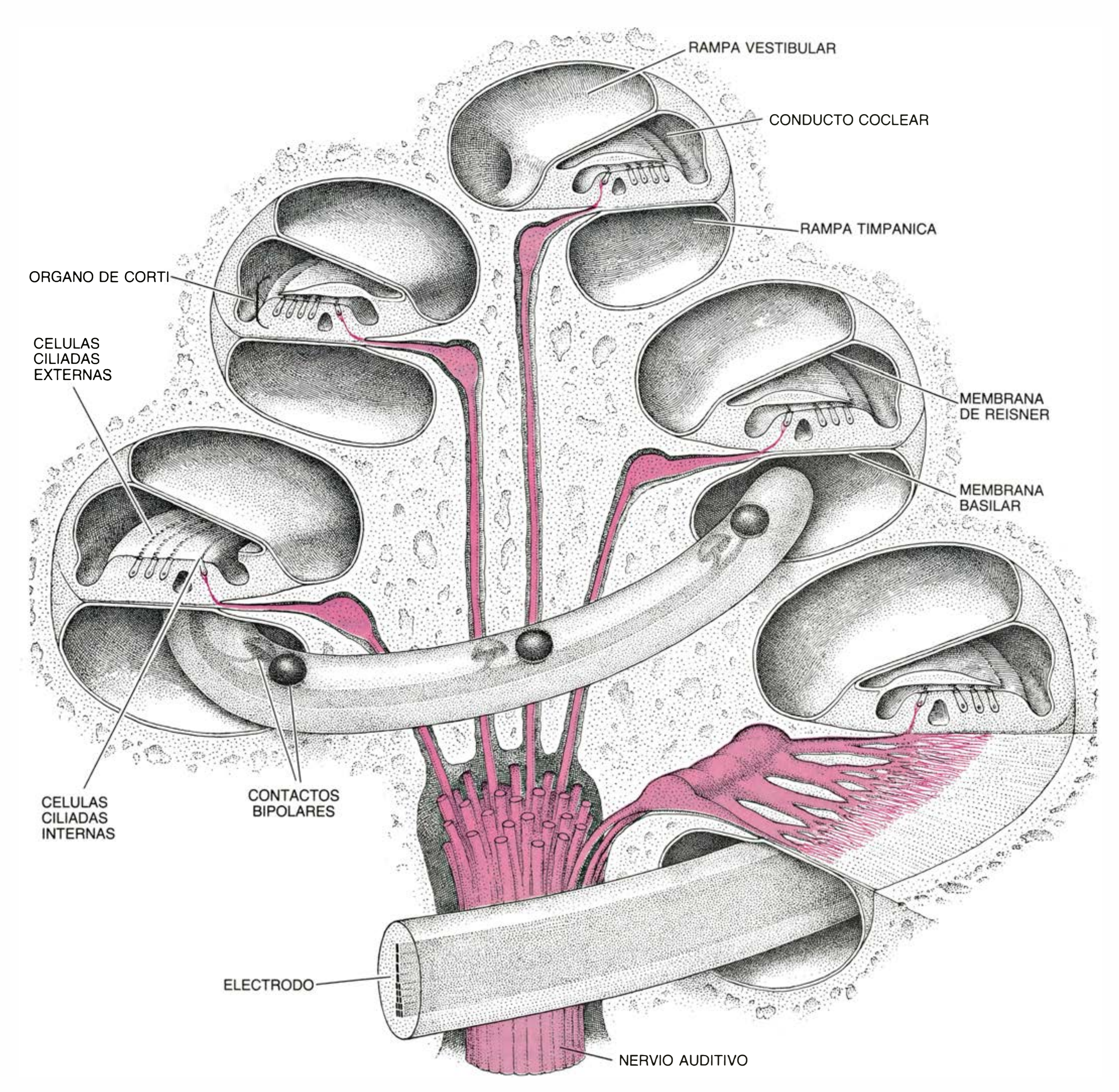


1. PROTESIS ACUSTICA EXPERIMENTAL desarrollada por personal de la Universidad de California en San Francisco, implantada en el oído de un paciente (*izquierda*). A la derecha, vista ampliada del interior de la cóclea, estructura en forma de caracol ubicada en el núcleo del oído interno. (Un paciente de sordera neurosensorial carecería de las hileras de células ciliadas sensoriales que se muestran en esta perspectiva.) El implante coclear aquí representado es un diseño bipolar de ocho canales: proporciona estímulos de ocho frecuencias distintas a grupos separados de fibras nerviosas auditivas de la cóclea,

recibir el visto bueno de la Administración de Alimentos y Drogas de los Estados Unidos para su implantación en pacientes con sordera neurosensorial. Desarrollado por William House, del House Ear Institute de Los Angeles, lo fabrica la compañía 3M.

Sistemas más refinados monocanales y multicanales, casi todos ellos en período de investigación, prometen proporcionar a estos pacientes una percepción sonora más ajustada. El estudio exhaustivo de las respuestas de pacientes y de los animales de experimentación a varios patrones de estimulación eléctrica, a partir de tales aparatos, tiene la ventaja de proporcionar, además, nuevas ideas sobre la codificación y decodificación normal de la información acústica.

En cierto sentido, la estructura de la información acústica es muy simple. La señal captada por un micrófono o un oído puede describirse por medio de una función de tiempo, caracterizada por el movimiento de un punto en el espacio, verbigracia, el centro del diafragma del micrófono o de la ventana oval de la cóclea. A pesar de esta simplicidad, tal señal contiene típicamente una información compleja sobre la fuente del sonido; el sistema nervioso es capaz de analizar la señal y extraer la información. En el caso del orador humano, el análisis suele bastar para identificar el interlocutor y sus palabras. La adición de un segundo canal de información en un punto separado del espacio, el otro oído, permite distinguir múltiples fuentes sonoras por sus posiciones relativas.



valiéndose para ello de ocho pares de contactos eléctricos, muy poco distanciados y distribuidos a lo largo del electrodo implantado. Los aparatos multicanal de esta clase, actualmente en fase de experimentación clínica, se espera que proporcionen una percepción sonora más real a los pacientes de sordera neurosensorial que los diseños monocanal hoy disponibles. En la figura 4 se muestra cómo operan los principales componentes de un "conductor" de este aparato. Aunque el citado conductor tiene sólo cuatro canales, el electrodo (que no puede remplazarse fácilmente por la presencia de tejido cicatricial) se ha diseñado para acomodar ocho; un conector, quirúrgicamente accesible en la base del conductor, facilitará su sustitución en las versiones mejoradas.

En el transcurso de este análisis, la función unidimensional debe descomponerse en sus frecuencias constituyentes; la separación de tales sistemas de ondas complejas en sus componentes espectrales por medio del método matemático de análisis de Fourier, avalado por el tiempo, es hoy práctica común en electrónica, y a menudo puede hacerse uso de ella en los modernos instrumentos de ensayo con la simple presión de un botón. Desde finales del siglo XIX se acepta que el cerebro debe utilizar una forma comparable de análisis de señal, cuando menos en los primeros estadios de la audición. También se ha reconocido que los canales del sistema nervioso a través de los cuales circula la información, las neuronas, son, intrínsecamente, muy lentos. De algún modo, un sistema analítico construido con gran número de canales de información, cada uno limitado a unas 300 pulsaciones por segundo, debe proporcionar un minucioso y casi instantáneo análisis espectral de señales que cubren una anchura de banda de entre 20 y 20.000 hertz (ciclos por segundo). Además, a pesar de la presencia de un ruido considerable en cada canal, la capacidad global del sistema no debe degradarse seriamente en un campo dinámico de un millón a uno (120 decibelios), desde el umbral de audición hasta el comienzo del dolor.

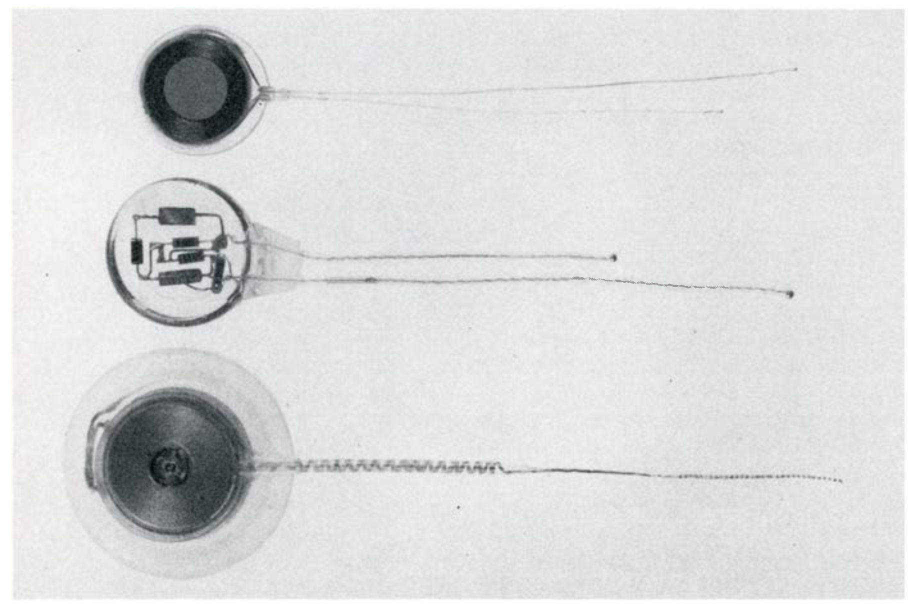
¿Cómo cumple el oído esta ardua tarea? Hermann von Helmholtz fue uno de los físicos que, en el siglo XIX, reconocieron que el órgano de Corti podía estar implicado, de alguna manera, en el muestreo de sonidos, que se separarían físicamente en sus componentes espectrales mediante las vibraciones, por simpatía, de la membrana basilar. Los estudios pioneros sobre el movimiento de la membrana basilar de Georg von Békésy, en la década de 1950, establecieron que, cuando se aplica sonido de frecuencia dada a la base de la cóclea, la membrana basilar vibra con máxima amplitud en un punto concreto, mecánicamente sintonizado con la frecuencia del sonido aplicado. Un sistema complejo de ondas acústicas, compuesto de varias frecuencias sinusoidales individuales, genera una distribución espacial de los picos de vibración por simpatía a lo largo de la membrana basilar; las frecuencias más agudas están representadas en la base de la espiral coclear y, las más graves, en el ápice. Las células ciliadas del órgano de Corti transforman el movimiento mecánico de la membrana basilar en actividad eléctrica en las fibras adyacentes del nervio auditivo; consecuentemente, se generan impulsos de baja frecuencia en los haces paralelos de fibras del nervio auditivo. Cada fibra sólo transmite información sobre la amplitud de la vibración de un punto particular.

En esta teoría de la percepción sonora de "un lugar para cada tono" se apoya el diseño de la mayoría de prótesis cocleares multicanal; veremos más adelante, sin embargo, que el mecanismo de un tono-un-lugar probablemente resulte insuficiente para explicar muchos de los importantes fenómenos psicofisiológicos de la audición, incluidas algunas características esenciales de la percepción normal del habla.

Un implante coclear se aprovecha de la circunstancia de que muchas de las fibras del nervio auditivo suelen permanecer intactas en los pacientes de sordera neurosensorial. Como en el caso de la mayoría de las células excitables eléctricamente, cabe estimular la descarga de las neuronas supervivientes de modo que propaguen impulsos nerviosos tras la aplicación de corrientes eléctricas externas de intensidad, duración y orientación adecuadas. Tales "potenciales evocados" llegan al cerebro semejando totalmente los impulsos generados por las señales acústicas que codifican las células ciliadas; de acuerdo con ello, el cerebro las interpreta como sonido.

La intensidad del sonido percibido depende, a grandes trazos, del número de fibras nerviosas activadas y del ritmo de sus impulsos. Ambas variables son función de la amplitud de la corriente de estímulo. El tono guarda relación con el lugar de la membrana basilar del que esas fibras nerviosas obtenían antes su "entrada" acústica, todo ello de acuerdo con la teoría de "un lugar para cada tono". En principio, con suficientes canales independientes de estimulación, cada uno de ellos controlando la actividad de un pequeño grupo localizado de fibras del nervio auditivo, cabría recrear la respuesta nerviosa normal a los estímulos acústicos de cualquier composición espectral. El cerebro procesaría esa información de la manera usual y el individuo "oiría" los "sonidos".

El problema frente al cual se encuentra el diseñador de prótesis nerviosas es que todas las fibras del nervio auditivo están sumergidas en un mismo baño de tejidos y fluidos conductores de electricidad. Una corriente eléctrica inyectada en ese medio tiende a desparramarse simétricamente a partir de su punto de origen; y así, la densidad de la corriente decrece con el cuadrado de la distancia a partir de la fuente monopo-



2. COMPONENTES IMPLANTADOS de tres prótesis auditivas distintas. Arriba aparece el implante coclear monocanal desarrollado por William House, del House Ear Institute de Los Angeles. Fabricado por la compañía 3M, es el primer diseño que ha recibido la aprobación de la Administración para Alimentos y Drogas de los Estados Unidos. Los componentes implantados son una simple bobina de alambre que conduce directamente a un par de electrodos en forma de bola, uno de los cuales se inserta en la rampa timpánica de la base de la cóclea. (El otro electrodo se conecta a masa en una parte cercana del oído medio.) En el centro se muestra un diseño monocanal más avanzado, desarrollado por Inge J. Hochmair-Desoyer y Erwin S. Hochmair, de la Universidad Politécnica de Viena, actualmente en período de ensayo en 3M. Se observa el circuito receptor dentro del envoltorio de plástico transparente; en este caso, los dos electrodos de bola se han diseñado para colocarlos fuera de la cóclea, en el oído medio. En la parte inferior aparece el diseño multicanal desarrollado por Graeme M. Clark y sus colegas, de la Universidad de Melbourne, y fabricado por Nucleus Limited. El envoltorio de titanio, herméticamente precintado, de este dispositivo contiene el complejo circuito necesario para decodificar una señal transmitida que selecciona, y actúa sobre, uno de los 22 contactos situados por el electrodo. (Fotografía de Quesada/Burke.)

lar. Para que un estímulo de ese tipo active selectivamente un haz concreto de fibras nerviosas auditivas, el electrodo debe estar mucho más cerca de esas fibras que de las demás.

Tal restricción es importante. Las fibras nerviosas auditivas se despliegan en su máxima extensión en cuanto entran en la membrana basilar del órgano de Corti. Se puede insertar en el conducto timpánico una serie longitudinal de electrodos que pasen a lo largo de la membrana basilar hasta una distancia de unos 25 milímetros, a partir de una segunda abertura en la base de la cóclea, llamada ventana redonda. Distribuidas a lo largo del camino se hallan las fibras que normalmente transmiten información sobre frecuencias sonoras de alrededor de 500 hertz. La distancia más corta desde las fibras nerviosas auditivas hasta la mejor localización en la rampa timpánica (a lo largo de la pared medial) es del orden de un milímetro. Un impulso de corriente de estimulación cuatro veces por encima del umbral de las fibras, en una localización determinada (caracterizada por una moderada intensidad sonora), puede influir sobre fibras que se hallen a dos milímetros en ambas direcciones.

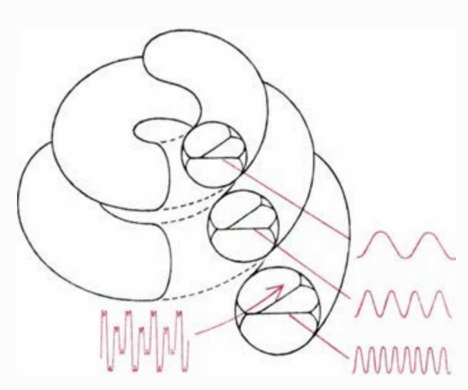
Si se tienen en cuenta las variaciones naturales de tamaño de las fibras y su sensibilidad a la estimulación, la difusión del estímulo probablemente resulta incluso mayor. Obviamente, sólo un pequeño número de puntos de estimulación independiente, con un gama dinámica apreciable, puede acomodarse a lo largo de la longitud disponible. Para la percepción del habla, la amplitud de banda crítica se encuentra entre los 500 y los 3000 hertz, lo que equivale a una distancia, a lo largo de la membrana basilar, de menos de 14 milímetros; en esa longitud pueden acomodarse dos o tres puntos independientes de estimulación, que contengan una gama dinámica razonable. Experimentos de simulación del habla por medio de un pequeño número de generadores de amplitud modulable en un solo tono sugieren, por otra parte, que debemos disponer al menos de seis canales para que resulte inteligible el habla.

Una manera de dividir eficazmente las fibras en un número adecuado de canales distintos es aplicar la estimulación bipolar. En este enfoque, la fuente y el sumidero del impulso eléctrico se colocan muy cerca uno del otro. (En la estimulación monopolar el sumidero de corriente necesario para completar el circuito es un amplio y remoto contacto que actúa de masa para todas las fuentes.) Las líneas de densidad eléctrica alrededor de un par de electrodos bipolares semejan las líneas de flujo magnético que rodean la barra de un imán: tienen una forma elíptica, cuyo eje mayor se orienta en dirección paralela a la línea que une los polos [*véase la figura 5*].

Puesto que la activación de neuronas requiere la inducción de corrientes longitudinales a lo largo de sus prolongaciones, los electrodos bipolares orientados perpendicularmente al eje largo de la rampa timpánica (radialmente a la espiral) pueden activar de forma selectiva las fibras nerviosas locales que pasan sobre ellos mismos. Además, el gradiente de densidad eléctrica en los tejidos que se extienden fuera del par de electrodos bipolares es mucho más acusado que en el correspondiente a los electrodos monopolares: se reduce la difusión del estímulo incluso a intensidades elevadas. Los ensayos, tanto en animales como en pacientes con prótesis cocleares, han mostrado que tales electrodos bipolares radiales producen una activación más localizada sobre la amplia gama dinámica de lo que lo hacen los montajes monopolares o los bipolares longitudinales.

El número real de canales independientes que se pueden establecer, y su gama dinámica, dependen del estado de las fibras nerviosas auditivas aprovechables. Estas, algunas veces, se marchitan a cierta distancia del órgano de Corti, aumentando su separación de un electrodo que esté alineado en la rampa timpánica. En algunos pacientes, sin embargo, parece que los pares bipolares radiales se pueden colocar con una separación de dos milímetros sin que se produzca interacción significativa. Este espaciamiento permite que ocho canales independientes alcancen los puntos de las frecuencias del habla que se hallan entre los 10 y los 24 milímetros a partir de la ventana redonda.

Son varios los problemas técnicos que surgen a la hora de conducir en la práctica la estimulación de esos ocho canales bipolares al nervio auditivo humano. Los primeros 24 milímetros de la membrana basilar están enrollados en una vuelta y media de las dos y media de que consta la espiral coclear. La ventana redonda de la rampa timpánica se encuentra en la parte posterior de la cavidad del oído medio, lo que obliga al cirujano a trabajar a través del largo y estrecho conducto auditivo externo. Significa ello que el electrodo debe sostenerse en una configuración rectilínea mientras va introduciéndose en la cóclea. Sin embargo, no puede empujarse en la espiral coclear cual mandril o guía de fontanero por un tubo curvado de desagüe. La sección semicilíndrica de la rampa timpánica determina que un objeto flexible que se empuje contra la pared lateral se desvíe hacia arriba, contra la membrana basilar, extremadamente frágil. El líquido del conducto coclear que se halla justo encima de la membrana tiene un alto contenido en potasio, que lo hace tóxico para las fibras del nervio auditivo en el caso de que se derrame por la rampa timpánica.



3. "UN LUGAR PARA CADA TONO" es la teoría que explica cómo el sistema coclear de detección de los sonidos separa un sistema complejo de ondas acústicas en sus componentes espectrales. En esta representación de la teoría, una onda sonora compuesta que se propaga en el fluido coclear provoca una vibración por simpatía en la membrana basilar, el fino y flexible tabique que separa dos de los tres conductos espirales de la cóclea. Los puntos de máxima vibración se distribuyen espacialmente a lo largo de la membrana; tal como se muestra aquí, las frecuencias más agudas se detectan en la base de la cóclea y, las más graves, en el ápice.

Se ha resuelto el inconveniente utilizando electrodos muy delgados y fláccidos, que, en teoría, pueden colocarse en posición con lesiones mínimas. Sin embargo, resulta difícil, si no imposible, controlar la orientación exacta de los contactos de estimulación de un electrodo semejante; éste tiende a apoyarse contra la pared externa, lejos de las fibras nerviosas que hay que activar. La selectividad y gama dinámica de la hilera radial de electrodos bipolares dependen de la cuidadosa posición de cada par en la pared media.

Tarea que sólo puede efectuarse usando un electrodo bastante grueso, con "memoria" de la hechura espiral, que haga que el electrodo acaricie la pared media a lo largo de las vueltas. Se han alcanzado esas propiedades de manejo en una formación de ocho pares bipolares diseñada por un equipo de investigación de la Universidad de California en San Francisco. Combina las propiedades mecánicas de un soporte de caucho silicónico y de un alambre de acompañamiento de platino e iridio, especialmente aplanado y comprimido,

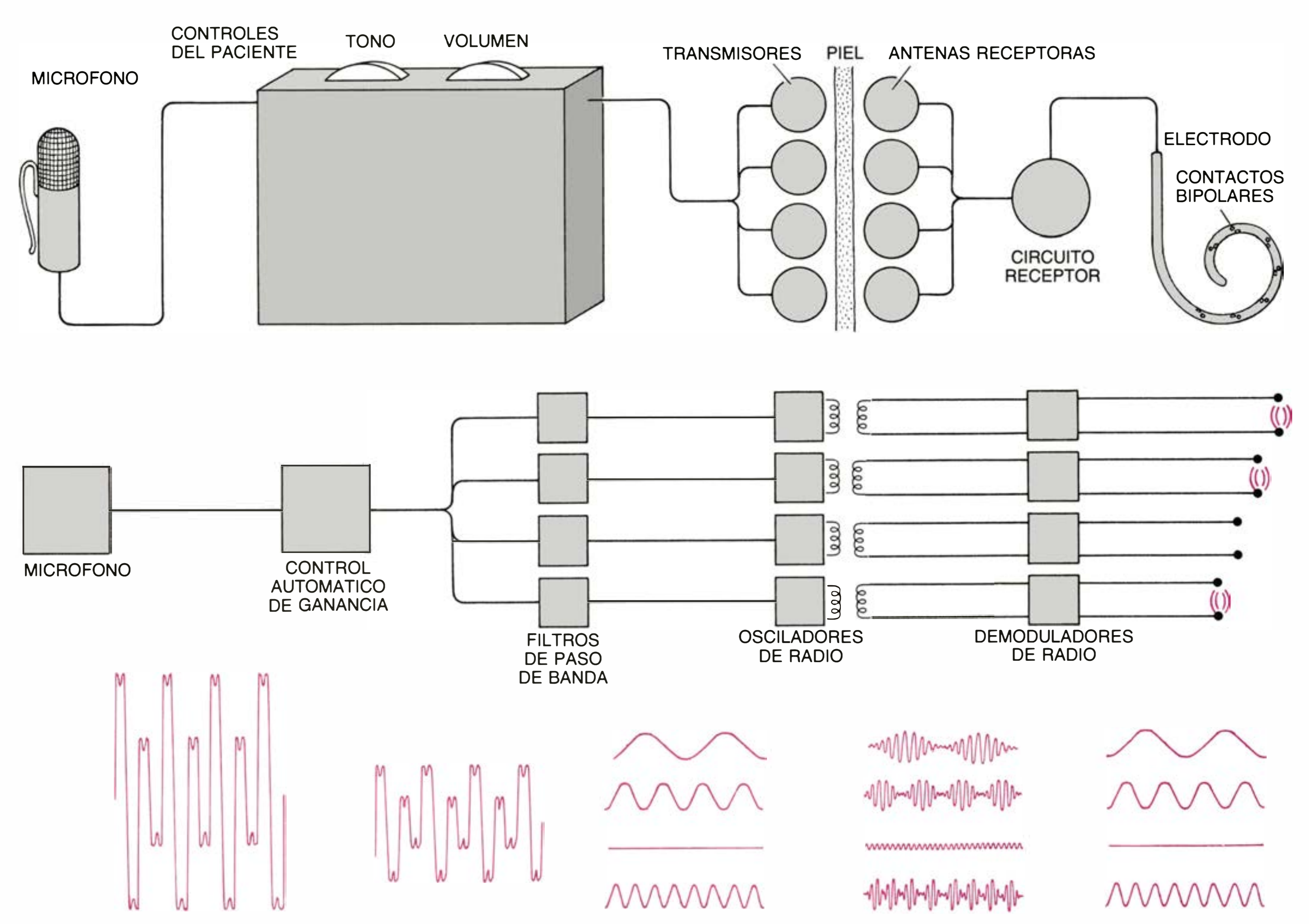
con 16 electrodos de contacto distribuidos a lo largo de la forma espiral [*véase la figura 1*].

El suministro de la corriente eléctrica desde el circuito electrónico hasta los tejidos biológicos es también cuestión delicada. Las corrientes eléctricas las acarrean, en los conductores metálicos, los electrones, mientras que en los fluidos acuosos del cuerpo las portan iones. Las reacciones electroquímicas que se dan en la interfase de los metales, por biocompatibles que sean éstos, y la compleja composición de los fluidos del cuerpo, entrañan muchos riesgos, tanto para los electrodos como para los tejidos. La corrosión electrolítica de muchos metales supuestamente inertes resulta inmediatamente acrecentada por la actividad quelante de los iones cloruro, los de mayor carga negativa del fluido extracelular. Este proceso altera las propiedades eléctricas de la interfase y libera iones de metales pesados altamente tóxicos en la inmediata vecindad de las neuronas, que se cuentan entre las células más sensibles del organismo. La mera electrólisis del agua puede crear burbujas de hidrógeno y oxígeno, susceptibles de reventar mecánicamente, generando concentraciones locales de iones hidroxilo e hidronio que pueden alcanzar niveles tóxicos de alcalinidad y acidez, respectivamente.

En los años más recientes estas reacciones y sus consecuencias se han estudiado en su aspecto cuantitativo, principalmente por parte de S. Barry Brummer y sus colegas, de los laboratorios EIC de Norwood, Massachusetts. Han establecido ciertas condiciones, más bien estrictas, que deben satisfacerse para que las corrientes eléctricas que atraviesan ciertos metales, como el platino y el iridio, induzcan corrientes iónicas sin riesgo en los fluidos del cuerpo, por medio de reacciones electroquímicas reversibles y no tóxicas.

Dispuestos los electrones en su sitio y dada la corriente, ¿qué oye el paciente? Los resultados han sido hasta la fecha una mezcla, generalmente alentadora pero algo confusa, de hechos esperados e inesperados.

La muestra más amplia de pacientes se ha ensayado con estimuladores de un solo canal. Se han transmitido sistemas de ondas, moderadamente filtrados, tomados directamente de un micrófono, a un estimulador implantado que activa algunas fibras nerviosas auditivas, próximas a la base de la cóclea. Como era de suponer, las sensaciones correspon-



4. FUNCIONAMIENTO DE UN IMPLANTE DE CUATRO CANALES. Se capta el sonido con un micrófono de solapa y se envía para su procesamiento a una caja que lleva el paciente, equipada con controles de audífono convencional para el tono y la intensidad. Un circuito de control automático de la ganancia ubicado en una pastilla microelectrónica dentro de la caja reduce en primer lugar las amplias fluctuaciones de la intensidad que caracterizan el ambiente sonoro normal a una gama mucho más limitada, adecuada para la estimulación eléctrica del oído interno. Una batería de filtros de paso de banda divide entonces el complejo sistema de ondas de corriente alterna en cuatro canales de frecuencia, que corresponden a los principales formantes producidos por el sistema humano de voz al emitir los sonidos vocales. Las señales resultantes, de banda estrecha (una de las cuales es nula en este ejemplo), modulan la amplitud de cuatro osciladores de radiofrecuencia independientes, montados en el conjunto de antena y bobina. En el cuero cabelludo se sostienen las antenas transmisoras sobre las bobinas receptoras implantadas por medio de pares de imanes de cerámica. Cada circuito receptor actúa como un sistema independiente de radio AM (modulada en amplitud), que demodula la frecuencia portadora y recupera la señal original de banda estrecha para su transmisión directa a un par de contactos de estimulación del electrodo, que se ha insertado en la rampa timpánica. Este esquema se limita a un número de canales bastante pequeño. Un grupo de la Universidad de Stanford ha desarrollado recientemente un sistema mejorado de ocho canales en el cual las características detalladas de cada señal de salida del canal se codifican digitalmente para transmitirlas sobre una frecuencia portadora.

den a un ruido complejo, modulado en amplitud. Sólo se tiene una sensación difusa de tono y únicamente para frecuencias de estimulación por debajo de unos pocos centenares de hertz. Sin embargo, se capta con fuerza el sentido del ritmo y de la intensidad del sonido. En pacientes sordos profundos, a los cuales incluso las más potentes prótesis acústicas convencionales no les ayudan, esta información sonora les puede proporcionar datos muy útiles en su vida cotidiana. Las frecuencias más graves del espectro acústico contienen información importante sobre la presencia y naturaleza de ruidos ambientales tales como los sonidos de los teléfonos y automóviles, y sobre la sonoridad y cadencia del habla, tanto en relación a la propia vocalización del sujeto como a la de aquellas personas de las que intenta leer en los labios. La mayoría de los pacientes con sordera congénita o iniciada en edad adulta han sido usuarios entusiastas hasta de la más rudimentaria prótesis monocanal.

Los esfuerzos actuales se encaminan a mejorar la calidad del sonido por preprocesamientos más complejos y por una mayor fidelidad de los sistemas que sirven para transmitir las señales desde la unidad de control del paciente hasta los electrodos implantados. Un avance importante ha sido el convencimiento de que la mayoría de las capacidades de los monocanales, si no todas, pueden alcanzarse con estimulación extracoclear en el oído medio. Estos hallazgos son prometedores para una aplicación clínica de la tecnología, conservadora pero importante, a muchos pacientes (particularmente niños) durante un período de incertidumbre sobre la evolución y conflictividad de los aparatos multicanal. Sin embargo, es de todos conocido que los estimuladores monocanal no suministran al sistema nervioso la información suficiente que capacite al paciente para una conversación sin ayuda visual.

La eficacia de las diversas prótesis multicanal de que hoy disponemos es menos clara. Los diseños son de por sí complejos y sólo unos pocos pacientes de los que los utilizan han sido objeto de estudio. Además, el conjunto de esos pacientes cuenta con individuos en los cuales varía de manera considerable la causa de la sordera y, en consecuencia, el estado del nervio auditivo.

Cuando se activa un haz pequeño y localizado de terminaciones nerviosas auditivas de la cóclea con un modelo multicanal (ya sea por estimulación monopolar de baja intensidad o por estimulación bipolar), la sensación de ruido se produce en determinada tonalidad. Si se activan de manera secuencial varios haces, físicamente separados, el sujeto no tiene dificultad alguna en ordenarlos en una escala musical. Resulta importante señalar que el término psicofísico "altura tonal" se refiere a un juicio subjetivo del observador, usualmente procedente de un sistema de ondas acústico muy complejo, que puede transportar escasa o nula energía espectral de la frecuencia que realmente corresponde al tono establecido. Los pacientes con prótesis multicanal han comparado lo que oían con el graznido de los patos o el estrépito de las latas desechadas. Tales sonidos pueden clasificarse por su altura tonal, pero en absoluto como los tonos puros que se perciben en los sistemas de ondas acústicas sinusoidales.

No está claro si esas sensaciones auditivas complejas pueden combinarse del mismo modo que lo hacen las ondas sinusoidales puras en los experimentos de simulación verbal. El sistema nervioso auditivo normal muestra una extraordinaria capacidad para extraer informaciones subyacentes a señales ruidosas y generalizar a través de patrones espectrales, relacionados únicamente de un modo muy distante. A ello se debe que podamos entender el lenguaje humano de un bajo y de una soprano, de un siseo y de un grito, de un orador con grandes variaciones de acento, nasalidad e inflexión. De hecho, la presentación espectrográfica de una palabra determinada es tan compleja y variable que incluso un analista experimentado no lograría identificar la mayoría de las palabras a partir de tales registros visuales.

Se investigan hoy, en su vertiente clínica, dos enfoques distintos de la hipótesis "un lugar para cada tono". Uno de ellos guarda relación con el canal de frecuencias, o "vocoder", simulador de sonidos verbales, en el cual se filtra la señal acústica en una serie de bandas, que vienen a corresponder a la gama de tonos percibidos por uno de los pares de electrodos bipolares de que se dispone. Para ocho de tales electrodos debería haber ocho activaciones independientes de la variación temporal de los haces del nervio auditivo, cada una de cuyas activaciones transportaría información de la intensidad relativa e instantánea de la energía sonora en su propia banda. En principio, el tipo concreto de sistema de ondas modulado en amplitud que se utilice para activar cada canal no importa. Sin embargo, por diversas razones, los sistemas de ondas transmitidos por cada filtro de paso de banda en el procesador de sonido suelen aplicarse directamente a los electrodos. Se añaden unas etapas especiales de preprocesamiento para compensar la estrecha gama dinámica y la sensibilidad de las neuronas a las corrientes eléctricas, que depende de la frecuencia.

Se confía en que el número de canales de estimulación paralelos e independientes tenga un efecto significativo en la inteligibilidad del habla. Este efecto, sin embargo, sólo se manifestará si cada uno de esos canales activa realmente un haz bien localizado de fibras del nervio auditivo dentro de la gama dinámica y los patrones temporales típicos de la audición normal.

Al menos cinco equipos independientes de investigadores han estudiado pacientes equipados con implantes de tres a doce canales de estimulación. En general, las diferencias en las técnicas quirúrgicas, la configuración de los electrodos y la selección de los sistemas de ondas, junto con la variabilidad individual de los pacientes, superan cualquier comparación significativa. En unos pocos casos, se ha experimentado en un mismo paciente una variación sistemática de la división del espectro verbal en distinto número de bandas y canales. El aumento de los canales conducía a una espectacular e inmediata mejora en el reconocimiento de la palabra en sujetos cuyos electrodos permitían tal activación localizada. La identificación de palabras de una muestra debidamente seleccionada ha llegado a ser hasta del 80 por ciento con una estimulación de sólo cuatro canales, un nivel que alcanza la rehabilitación funcional, dada la redundancia e indicaciones del contexto que se dan en una conversación ordinaria.

Un planteamiento alternativo al del código "lugar-tono" empleado en la mayoría de los diseños multicanal estriba en un electrodo de hilera multicanal que continuamente varía el punto de aplicación de una estimulación de canal único. Ambos, los electrodos y el sistema de transmisión, quedan considerablemente simplificados en este esquema, pero el procesamiento de la señal verbal es mucho más complejo. Incluso los electrodos monopolares situados muy cerca tienden a mostrar una secuencia ordenada de sensaciones "lugar-tono" cuando se activan individualmente, a lo que parece porque al sistema nervioso central le cuesta poco identificar el punto medio de un gradiente bastante ancho de neuronas excitadas.

La amplitud y la frecuencia de modulación de ciertas partes del espectro

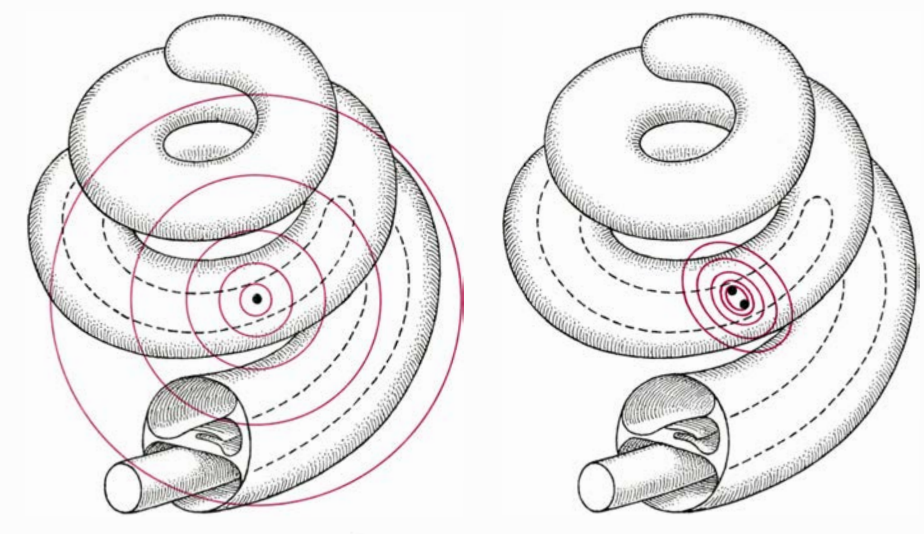
verbal, tales como los formantes producidos por la forma de la cavidad oral, transmiten información útil para la discriminación de muchos elementos acústicos del habla. Un procesador verbal integrado en una pastilla de microordenador identifica y rastrea ese rasgo espectral, conocido como segundo formante, y selecciona el mejor sitio e intensidad para la estimulación de acuerdo con un mapa de las sensaciones producidas por cada electrodo en un sujeto particular. La frecuencia de la estimulación aplicada en el punto activado por la corriente puede emplearse para codificar la frecuencia fundamental de la vibración de las cuerdas vocales, que corresponde a la gama de frecuencias más graves para las cuales el sujeto registra una sensación tonal parecida a la vibración. Un sistema de este tipo, de 22 electrodos, desarrollado por Graeme M. Clark y sus colegas, de la Universidad de Melbourne, se ha implantado en cerca de 20 pacientes. De nuevo, la variabilidad entre pacientes confunde cualquier intento de comparar los resultados con electrodos de un solo canal o con diseños multicanal, pero algunos sujetos, cuando menos, han obtenido puntuaciones significativas en los ensayos de reconocimiento de palabras.

Para lograr mejores resultados habrá que disponer de canales de información que correspondan al primer y tercer formante vocal, junto con consonantes de frecuencia aguda. Es posible que puedan aplicarse dos, o incluso tres, estímulos simultáneos sin interacción significativa de canales, siempre que quepa mantenerlos suficientemente separados. Queda por ver si el planteamiento general de la correlación inversa entre el número de canales y su independencia es capaz de proporcionar la información necesaria compatible con la capacidad de procesar información del sistema nervioso.

La complejidad de las sensaciones evocadas incluso por la más localizada estimulación de la cóclea ha sorprendido e intrigado a muchos investigadores. La teoría de "un lugar para cada tono", en su forma más simple, predice que la activación local evocará una sensación tonal francamente pura, correspondiente a la frecuencia de resonancia local de la membrana basilar. Los cambios de frecuencia y el sistema de ondas de la estimulación eléctrica se resolverán solamente en simples cambios de intensidad sonora y únicamente en tanto que tales cambios afecten al ritmo medio de disparo de las neuronas activas. ¿Cómo pueden producirse sensaciones de espectro complejo, como zumbidos o sonidos metálicos? ¿Pueden controlarse sistemáticamente de modo que proporcionen otro tipo de transferencia de la información por prótesis?

Se sabe desde hace tiempo que la actividad que el nervio auditivo transmite al cerebro contiene información temporal detallada acerca de la fase exacta del movimiento de la membrana basilar. Para frecuencias sonoras por debajo de los 5000 hertz, la temporización exacta de todo impulso nervioso de una fibra auditiva está ligada, o bloqueada, a la fase del movimiento mecánico percibido por la célula ciliada que le proporcione la señal de entrada. Aunque la fibra debe descansar durante dos o tres milisegundos entre impulsos, un análisis espectral de la actividad de cualquier fibra aislada revelará la frecuencia de la estimulación que la ha activado, corresponda o no dicha frecuencia a la frecuencia de resonancia característica de ese lugar de la membrana basilar. Algunas de las neuronas centrales que reciben señales del nervio auditivo tienen una estructura sináptica especializada que puede transmitir y conservar esa información de alta resolución temporal, a pesar de la limitación del ritmo global de disparo de unos 300 impulsos por segundo. Además, sujetos sometidos a estudios psicofisiológicos parecen ser capaces de extraer información espectral precisa, aun cuando la intensidad sonora del estímulo acústico provoque la saturación del ritmo de disparo sobre extensas regiones de la cóclea. En estos últimos años, Murray B. Sachs y Eric D. Young, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, han señalado la importancia potencial de esta información temporal para la discriminación de los sonidos vocales. Sus hallazgos sugieren que el sistema nervioso quizá sea capaz de extraer esa información espectral ligada a la fase, y que el fallo de una correcta reproducción de tales patrones temporales quizá genere sensaciones complejas, ruidosas.

¿Cuáles son las señales temporales críticas? Si varias señales nerviosas ligadas a la fase, cada una con un ritmo de disparo globalmente bajo, se combinan, puede reconstruirse la frecuencia de la señal acústica de origen. Este punto de vista, sin embargo, plantea la cuestión de cómo perciben la frecuencia las neuronas centrales que reciben tales impulsos de alta frecuencia. Una manera de concebir una neurona receptora que quede selectivamente sintonizada a una frecuencia de repetición concreta de su patrón de entrada es imaginar que se haya diseñado para operar según la técnica conocida como de autocorrelación temporal. En este enfoque, la señal de entrada se retrasa un tiempo igual a un ciclo de la frecuencia que ha de detectarse, y las señales



5. DIFUSION DE LA EXCITACION desde un punto de estimulación de la cóclea hasta partes distantes del nervio auditivo. Es el factor que más limita el número de canales de una prótesis coclear multicanal. El problema resulta particularmente enojoso en el caso de los contactos monopolares (*izquierda*). El aumento de la intensidad de la corriente de estimulación proporcionada por uno de dichos contactos induce a la corriente a desparramarse, según un patrón simétricamente radial, por las cámaras llenas de fluido del oído interno, permitiendo que la excitación alcance partes del nervio auditivo que están al servicio de puntos diferentes de la cóclea y, en consecuencia, den origen a sensaciones tonales distintas; las corrientes de estimulación de otros contactos ubicados en esas regiones podrían, a su vez, interferir el modelo descrito, haciendo ruidosa y difícil de resolver la separación de los canales de estimulación. Un procedimiento para confinar la difusión de la corriente de estimulación es emplear contactos bipolares radiales, que tienden a producir un patrón de estimulación mucho más localizado (*derecha*).

retrasada y no retrasada se multiplican juntas. En los modelos de percepción auditiva a menudo se postula la existencia de una hilera de esos detectores de periodicidad en las primeras etapas sinápticas del tronco cerebral.

Las teorías biofísicas predicen, y los experimentos animales lo han demostrado, que la estimulación eléctrica con sistemas de ondas, tanto sinusoidales como de corriente alterna pulsada, provocan un significativo bloqueo de fase de las fibras nerviosas auditivas para frecuencias que alcanzan como mínimo los 3000 hertz. A pesar de todo, los usuarios de prótesis manifiestan, de modo consistente, cambios muy pequeños de la altura tonal, y cambios solamente sutiles en la calidad del sonido, cuando la frecuencia del estímulo se incrementa por encima de los 300 hertz. Incluso cuando la frecuencia de resonancia natural del lugar estimulado y la frecuencia propia del sistema de ondas de estimulación coinciden, no hay mejoría súbita de la débil tonalidad de la sensación.

Tales observaciones están forzando un nuevo examen del tipo de mecanismos por medio de los cuales la red de neuronas extrae información temporal en una escala de tiempo que es más fina que sus procesos usuales de sinapsis y conducción. De acuerdo con el modelo propuesto por Mark W. White, Michael M. Merzenich y el autor, se daría una correlación espacial cruzada para detectar configuraciones particulares del movimiento de la membrana basilar, generadas por el progreso de las ondas "viajeras" de una frecuencia dada. El proceso es análogo a la localización de los sonidos en el espacio a partir del retraso de la señal entre los dos oídos; ciertamente, los dos procesos pueden compartir algo del mismo circuito nervioso. La resolución temporal, tanto de la localización sonora como de la discriminación de la frecuencia con bloqueo de fase, es del orden de los 10 microsegundos.

Obviamente, que puedan o no controlarse por medio de prótesis este proceso y las sensaciones a que da lugar dependerá de las señales de entrada críticas para cada proceso. Tal control quizá requiera un dominio de la estimulación eléctrica en el orden espacial y temporal más fino de lo que jamás pueda alcanzarse. Sin embargo, un simple detalle de la configuración de los electrodos o de la distribución del desencadenamiento del estímulo, todavía no ensayado, bien pudiera resolver la cuestión.

Aceros de Damasco

Contenían más carbono que la mayoría de los aceros modernos. Unida a un forjado muy hábil, esta propiedad explica la celebrada resistencia y tenacidad de las espadas de Damasco con sus dibujos característicos

Oleg D. Sherby y Jeffrey Wadsworth

En *El Talismán*, novela sobre las aventuras de los cruzados en Palestina, sir Walter Scott narra un encuentro entre Ricardo Corazón de León y Saladino, sultán de los sarracenos. Uno y otro antagonista ensalzaban las virtudes de sus respectivas espadas. Para demostrar la resistencia de su hoja de dos caras, recta y pesada, Ricardo cortó una maza de acero. En réplica, Saladino tomó una almohadilla de seda y "blandió (su) cimitarra atravesando la almohadilla... con tan poco esfuerzo que ésta parecía despedazarse sigilosa, rasgarse sin violencia". Los europeos, sobresaltados, temieron ser objeto de un engaño, hasta que Saladino repitió el gesto, ahora cortando al vuelo un velo de tela. En la narración de Scott, el arma maravillosamente afilada empuñada por los sarracenos tenía "una hoja curvada y estrecha sin el brillo de las espadas de los francos; antes bien, era de un color azul mate, marcada con diez millones de líneas serpenteantes".

Aunque el relato incorpora alguna que otra licencia poética (por ejemplo, la espada de Saladino no podía haber sido una cimitarra, puesto que las hojas curvadas no llegaron hasta cientos de años después del pretendido encuentro con Ricardo en 1192), se trata de un retrato sustancialmente exacto de un tipo de hoja usada por el Islam del tiempo de Saladino. Estas hojas se caracterizaron por su extraordinaria resistencia a la compresión: dotadas de la suficiente dureza para mantener un filo cortante afilado. Poseían, asimismo, la tenacidad necesaria para absorber golpes durante el combate sin producirse su rotura. Aquellas hojas debían sus virtudes mecánicas, así como sus bellas marcas superficiales ondulantes, al material del que habíanse forjado: acero de Damasco. En tiempos de las cruzadas, las cualidades de las espadas y armaduras de esa capital iban de boca en boca. Durante siglos enteros llenaron de fascinación, y de frustración, la mente de los herreros europeos, quienes en vano se esforzaron por reproducir el damasquinado característico, o modelo superficial.

El descubrimiento del secreto atrajo también la atención de eminentes científicos europeos, resueltos a ganar el desafío. Tal fue el caso de Michael Faraday, hijo de un herrero, quien atribuyó las propiedades únicas de un acero de Damasco analizado en 1819 (antes de inventar el motor eléctrico y el generador eléctrico) a pequeñas cantidades de sílice y alúmina. Aunque su conclusión fue errónea, el artículo de Faraday inspiró a Jean Robert Bréant, inspector de ensayos de la Casa de la Moneda de París, quien emprendió una serie de experimentos en los que añadía al acero distintos elementos. Bréant llevó a cabo por primera vez, en 1821, el experimento metalúrgico esencial para correr el velo que envolvía a los aceros de Damasco: demostró que su notable fuerza, tenacidad y belleza dependían de su alto contenido en carbono. Bréant identificó las áreas blancas del damasquinado como "acero carburado" y designó el fondo como "acero", sin más.

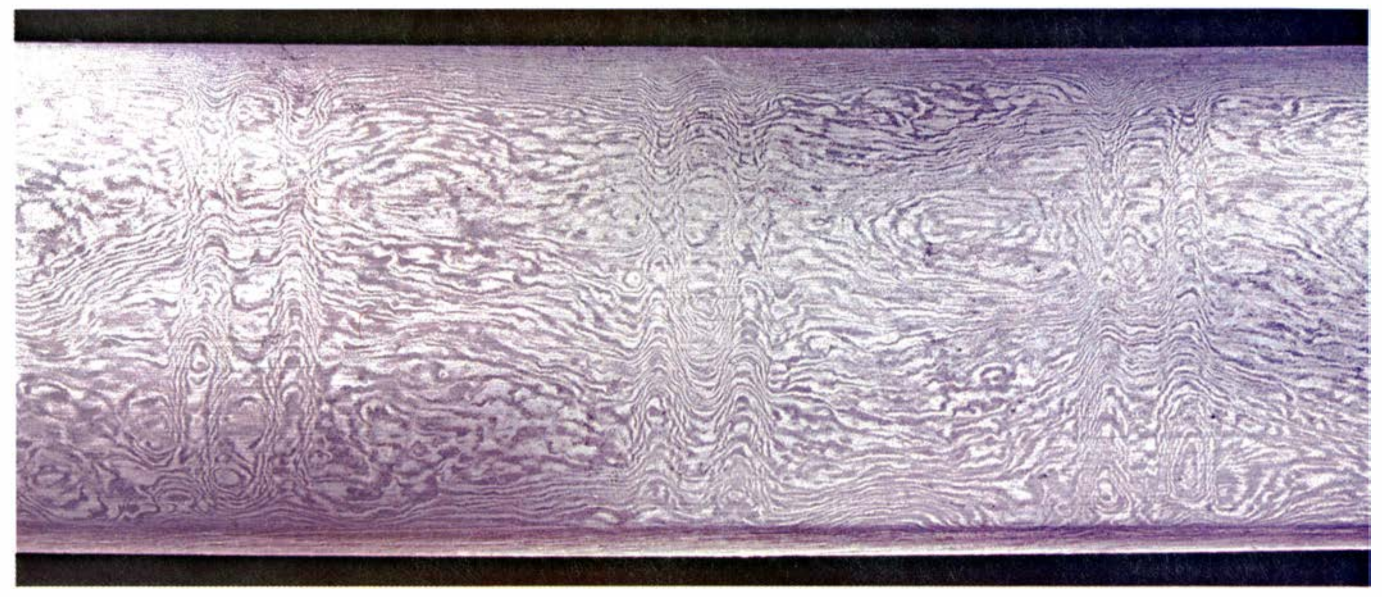
Bréant logró fabricar espadas de un modelo similar al de los aceros de Damasco, pero nunca explicó los pormenores del procedimiento. Además, ni siquiera él conocía la importancia de las distintas etapas involucradas en el mismo. La base para la comprensión científica de los aceros de Damasco no se estableció hasta principios de este siglo, cuando una serie de investigadores detallaron los cambios de fase que experimentan los aceros en función de la temperatura y del contenido en carbono. Incluso hoy, cuando ya se conoce el diagrama de fases hierro-carbono, el arte de la fabricación de las espadas de Damasco es un descubrimiento patentable según la ley norteamericana.

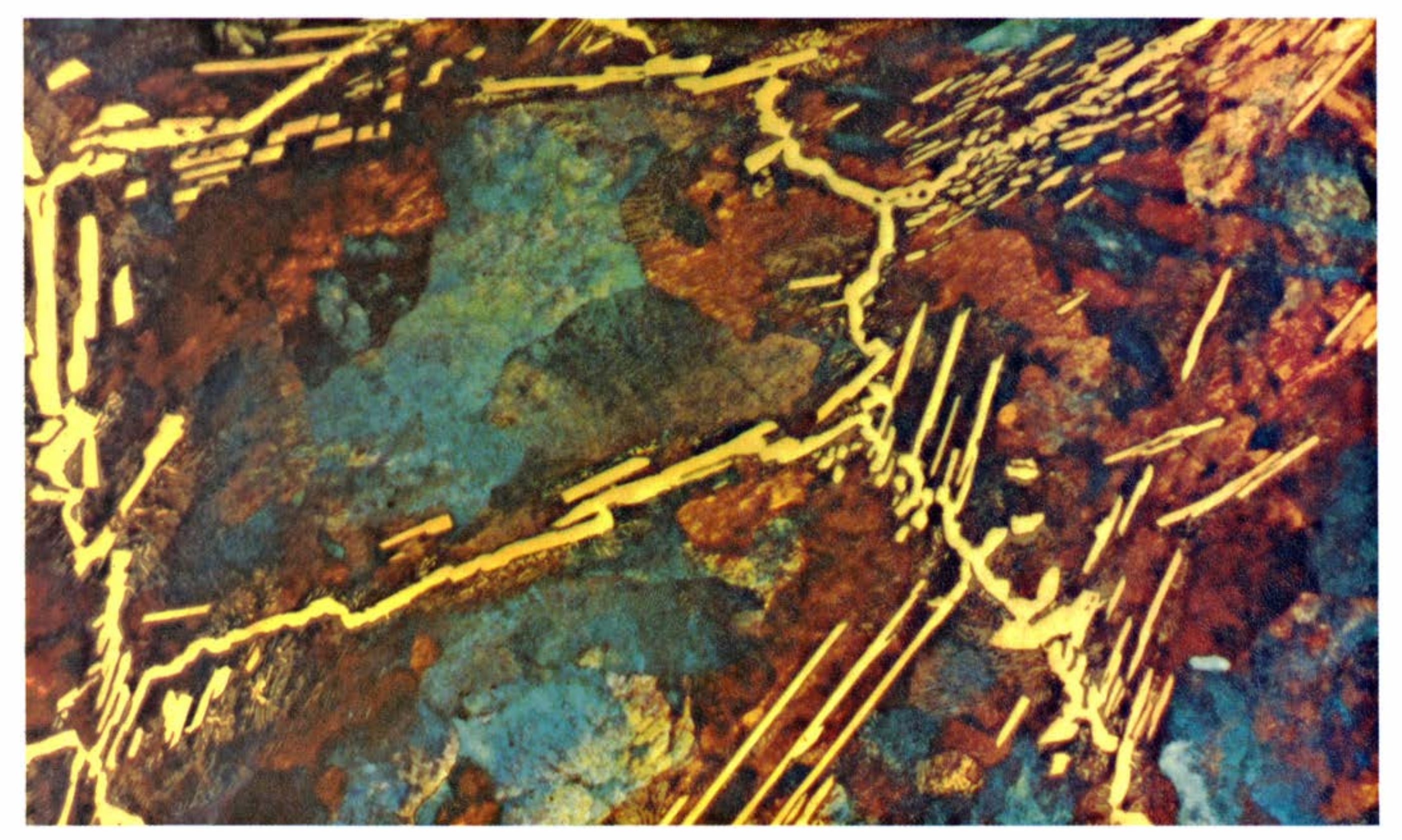
Nuestro interés por el tema arranca de una investigación que emprendimos sobre aceros modernos con un muy alto contenido en carbono. Tales aceros, que contienen del 1 al 2,1 por ciento de carbono, no suelen emplearse en aplicaciones comerciales porque se consideran frágiles. Ahora bien, la proporción de carbono en las espadas de Damasco oscila entre el 1,5 y el 2 por ciento. Su reputada tenacidad, indiscutible, sugiere que la fragilidad, inducida normalmente por el alto contenido en carbono, puede obviarse mediante tratamientos apropiados. En la Universidad de Stanford hemos fabricado aceros con muy alto contenido en carbono que, como las espadas, son a la vez fuertes y dúctiles a temperatura ambiente. Hemos logrado, asimismo, reproducir el legendario damasquinado, es decir, el modelo que presentaban los aceros de Damasco. Los procedimientos seguidos en nuestro laboratorio son en esencia similares a los inventados en las antiguas herrerías del Próximo Oriente.

La primera descripción de las espadas de Damasco data del año 540 d. C., aunque pudieron haberse utilizado bastante antes, en tiempos de Alejandro Magno (unos 323 años a. C.). Su nombre no deriva de su lugar de origen, sino del lugar donde los europeos las conocieron en sus luchas durante las cruzadas. El acero se fabricaba en la India, donde se le denominaba "wootz". Se expandió su comercio en forma de piezas moldeadas, o pastillas que tenían el tamaño de un disco de hockey. Según se cree, las mejores espadas se forjaron en Persia a partir de wootz de la India, aprovechado también para fabricar escudos y armaduras. La distribución geográfica de las espadas de Damasco, que siguió la propagación de la fe islámica, llegó hasta la Rusia medieval, donde fueron denominadas *bulat*.

Como todos los procesos de fabricación del acero, la manufactura del wootz comprende la eliminación del







1. **MARCAS SUPERFICIALES de una cimitarra persa (*arriba y centro*), que reflejan las variaciones en el contenido de carbono de un acero que presenta una elevadísima cantidad del mismo: las regiones blanquecinas del acero de Damasco son de carburo de hierro (cementita) y las oscuras del fondo son de hierro que porta una cantidad de carbono muy inferior. El modelo se evidenciaba únicamente después de que la hoja acabada se pulía y atacaba con un ácido que actuaba de un modo preferente en el hierro del fondo. La red cementítica se aprecia claramente en la micrografía de un acero moderno con un muy alto contenido en carbono (*abajo*); las capas de cementita también alternan con capas de hierro en la estructura del fondo. Los aceros de Damasco se hacían tenaces por forjado, éste dispersaba la cementita y daba al modelo superficial su aspecto final. Los efectos del forjado dejan su huella en las espadas persas: las marcas verticales de su modelo, denominado escalera de Mohammed, resultaban de la aplicación de golpes locales de martillo. La espada, que data del siglo diecisiete, se exhibe en el Museo de Arte Metropolitano de Nueva York. El aumento de la micrografía es de 200 diámetros.**

MOLDEO

1,200°C.

MENA DE HIERRO

CARBON VEGETAL

FUELLES

ESPONJA DE HIERRO

HIERRO FORJADO

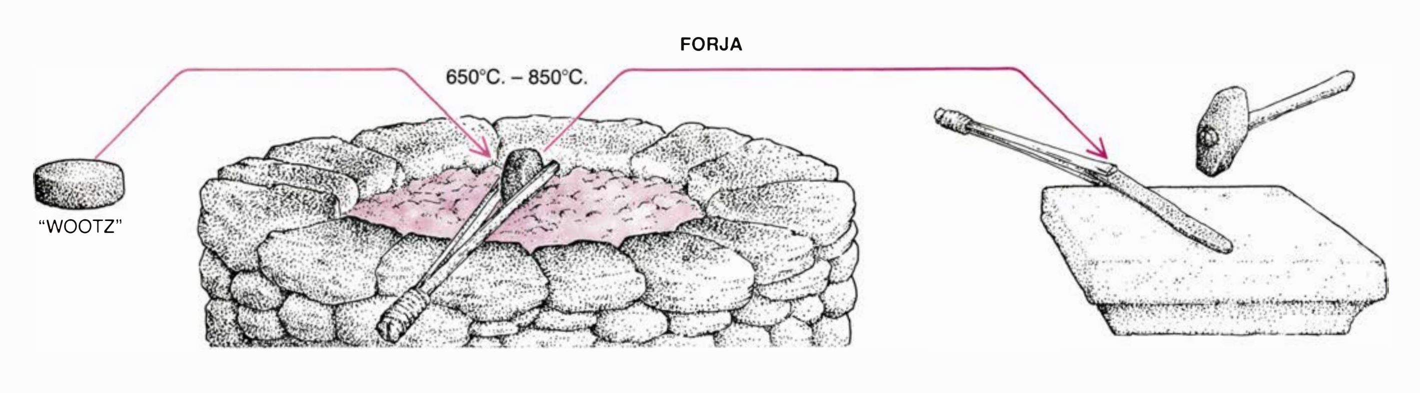
ENFRIAMIENTO LENTO

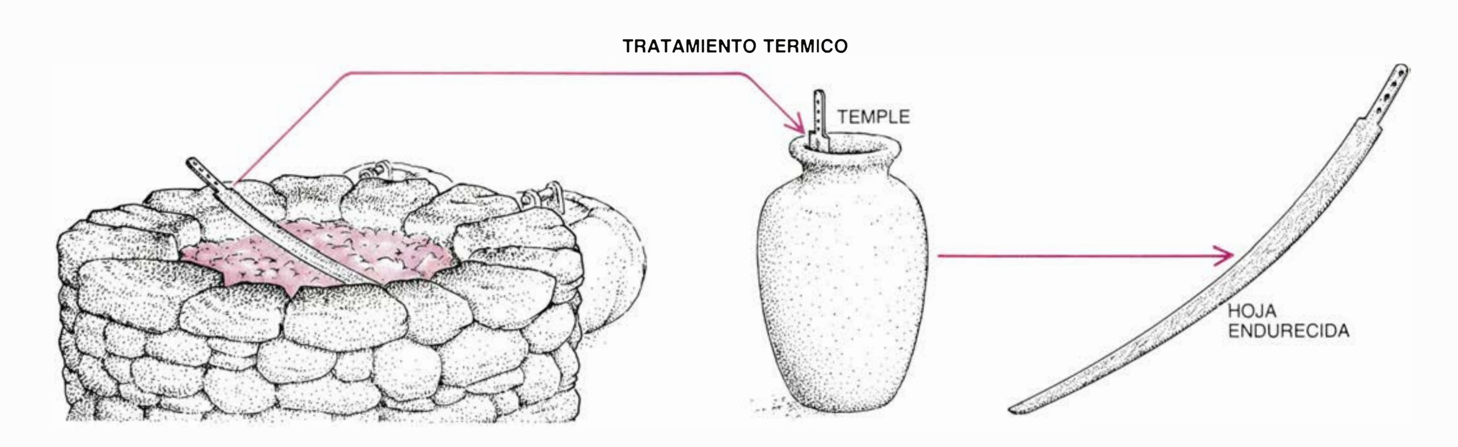
1,200°C.

CARBON VEGETAL

"WOOTZ"

CRISOL





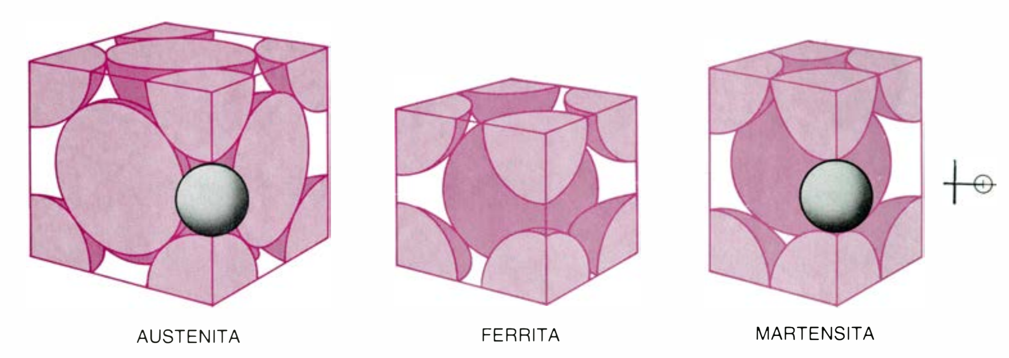
2. PROCEDIMIENTO DE FABRICACION típico de una espada de Damasco a partir de una pieza moldeada de un acero con un muy alto contenido en carbono, denominado "wootz" en las fundiciones de la India. La mena de hierro y el carbón vegetal se mezclaban y calentaban hasta unos 1200 grados Celsius en un crisol de piedra somero. El hierro se reducía (se le privaba del oxígeno) a través de reacciones con carbono que provenía del carbón vegetal y adquiría una consistencia esponjosa. Con la expulsión de las impurezas, de la esponja de hierro por martilleo, se conseguía una pieza de hierro forjado que poseía un bajo contenido en carbono. Concentración que aumentaba con el calentamiento de las piezas de hierro forjado mediante carbón vegetal en un crisol de arcilla, que se sellaba para evitar que el hierro se oxidara de nuevo. Un sonido de chapoteo indicaba la presencia de cierta cantidad de materia fundida y el crisol se dejaba enfriar lentamente en el horno. El "wootz" era comercializado en forma de pastillas de 75 milímetros de diámetro. Los herreros del Próximo Oriente forjaban una hoja de Damasco a partir de una pastilla que se calentaba entre 650 y 850 grados Celsius; los aceros con un muy alto contenido en carbono son dúctiles en este intervalo de temperaturas. Los artesanos endurecían las hojas acabadas recalentándolas y templándolas luego.

oxígeno de la mena de hierro, que es un óxido; la adición de carbono fortalece al hierro reducido y lo transforma en acero. La fuente de carbono era carbón vegetal, madera y hojas. Normalmente se mezclaban la mena de hierro y el carbón vegetal y, a continuación, se calentaba la mezcla en el interior de un crisol de piedra hasta unos 1200 grados Celsius. El oxígeno se expulsaba de la mena a través de reacciones con el carbono procedente del carbón vegetal. Dependiendo de la cantidad de carbón vegetal en la mezcla, el producto era hierro forjado, que tenía un contenido en carbono muy bajo, o bien fundición que poseía más de un 4 por ciento en carbono. Los fabricantes de acero de la India manufacturaban wootz añadiendo carbono al hierro forjado o eliminando carbono de la fundición.

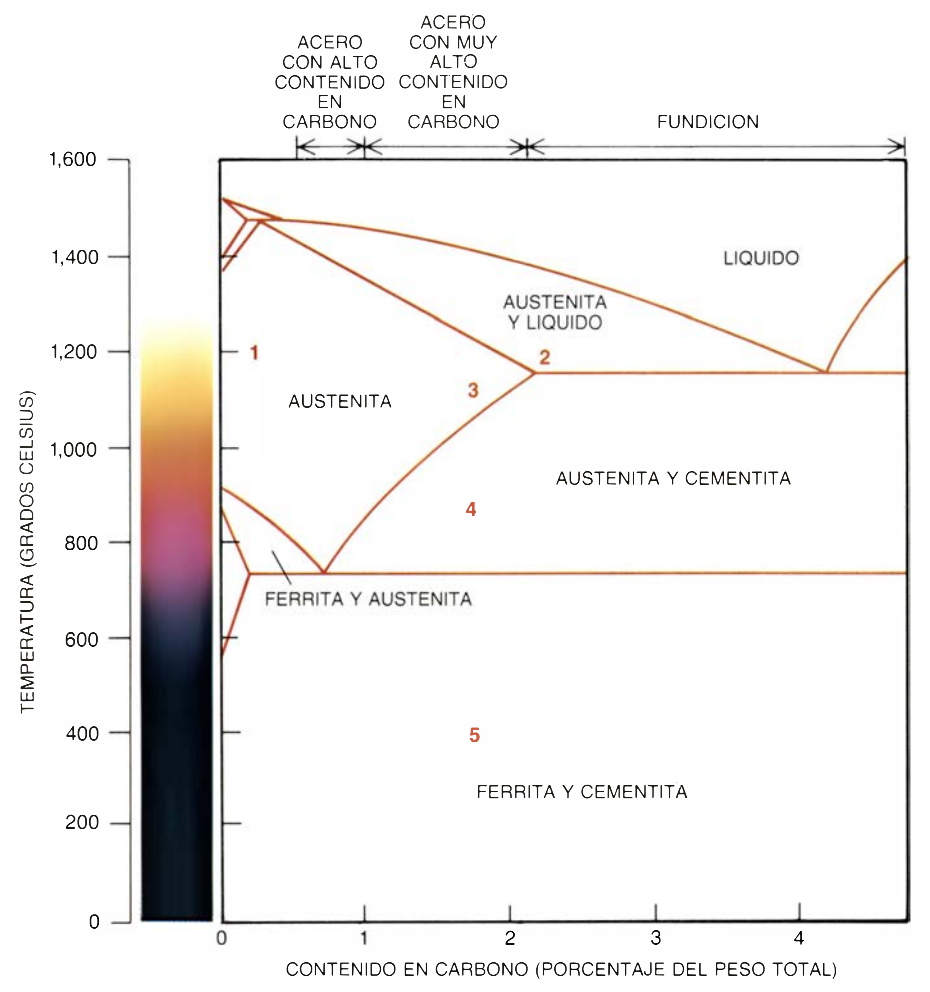
El procedimiento para obtener wootz a partir de hierro forjado se conoce mejor que el procedimiento que parte de la fundición. Piezas pequeñas del metal se mezclaban con carbón vegetal en un crisol sellado de arcilla, de unos 75 milímetros de diámetro por 150 de alto. El crisol se calentaba aproximadamente a unos 1200 grados Celsius. A esta temperatura el hierro forjado se encuentra todavía en estado sólido, pero sus cristales tienen una estructura cúbica centrada en las caras que puede acomodar átomos de carbono en los huecos que existen entre los átomos de hierro [*véase la figura 3*]. Así pues, el carbono se difundía gradualmente en el hierro, formando una aleación conocida hoy por austenita.

La adición de carbono disminuía la temperatura de fusión del metal. Cuando el contenido en carbono en la superficie de las piezas de hierro forjado superaba el 2 por ciento, se empezaba a formar sobre las piezas una delgada capa líquida de fundición blanca. La presencia de materia en estado líquido se reconocía mediante un sonido de chapoteo que se percibía al agitar el crisol; indicaba que se había disuelto en el hierro una cantidad significativa de carbono.

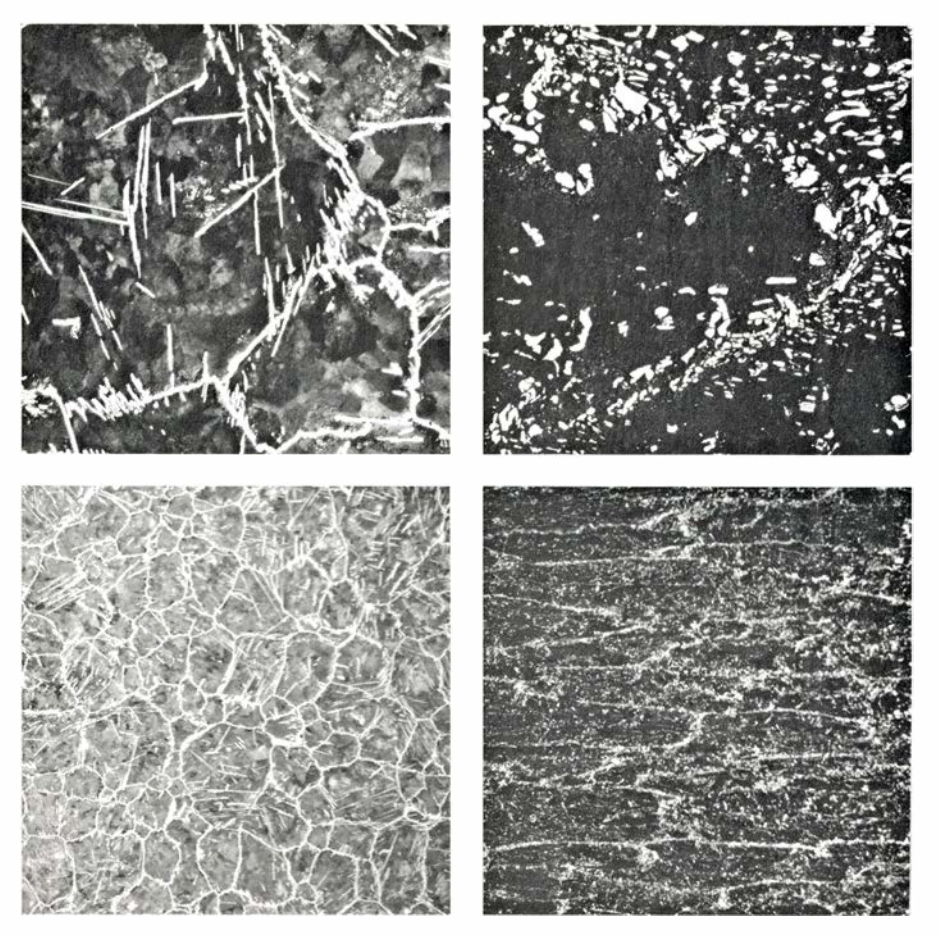
A continuación, se enfriaba el crisol muy lentamente; a veces, durante días. El enfriamiento lento producía una distribución homogénea de carbono por todo el acero, que oscilaba entre el 1,5 y el 2 por ciento. Cuando la temperatura del metal se situaba por debajo de los 1000 grados Celsius precipitaba cierta cantidad de carbono formando una red de cementita, o carburo de hierro (Fe_3C), que rodeaba los granos austeníticos. En ese lento enfriamiento los



3. CRISTALES DE HIERRO en aceros con muy alto contenido en carbono; se desarrollan en tres formas. A temperaturas superiores a los 727 grados Celsius, la configuración estable es una red cúbica con los átomos de hierro en el centro de cada cara. La red centrada en las caras puede albergar átomos de carbono (*bolas oscuras*) entre los átomos de hierro. Así pues, a altas temperaturas el carbono se disuelve en el hierro; la disolución se denomina austenita. Si el acero se enfría lentamente hasta la temperatura ambiente, los cristales de hierro se convierten en una forma cúbica centrada en el cuerpo en la que apenas queda sitio para el carbono; esta fase se llama ferrita. Si el acero es enfriado rápidamente (temple), los átomos de carbono son atrapados en cristales tetragonales centrados en el cuerpo, llamados martensita.



4. DIAGRAMA DE FASES HIERRO-CARBONO, base para el conocimiento de las propiedades y el proceso de fabricación de las espadas de Damasco. Cuando el hierro forjado y el carbón vegetal se calentaban a 1200 grados Celsius en un crisol el hierro se convertía en austenita centrada en las caras (*1*). El carbono que procedía del carbón vegetal podía disolverse en el hierro, rebajando su temperatura de fusión. En la superficie de las partículas de hierro se formaba una función líquida cuando el contenido en carbono de la capa superficial excedía el 2 por ciento (*2*). Mediante un enfriamiento lento se permitía que el carbono se difundiera a través del metal, produciendo un acero con un contenido medio en carbono entre el 1,5 y el 2 por ciento (*3*); posibilitábase, además, que los granos alcanzaran un tamaño considerable. Cuando la temperatura descendía por debajo de los 1000 grados Celsius, el carbono de la disolución precipitaba en cementita en los límites de grano (*4*). La red de cementita gruesa era el origen de las marcas típicas del acero de Damasco. Cuando la temperatura descendía por debajo de los 727 grados, la austenita de caras centradas se convertía en capas alternadas de cementita y de ferrita centrada en el cuerpo pobre en carbono (*5*). Las hojas se endurecían mediante recalentamiento por encima de los 727 grados y posterior templado que convertía a la austenita en martensita. (Los cristales de la martensita son más duros que la ferrita.) Los herreros medievales estimaban la temperatura del metal por su color.



5. EFECTOS DEL FORJADO en los aceros de Damasco. Se han simulado laminando un acero moderno con un muy elevado contenido en carbono. El acero se muestra a 130 aumentos (*arriba*) y a 6,5 aumentos (*abajo*). Antes del laminado (*izquierda*), la ligera red de cementita es continua; sus dimensiones son casi las mismas en todas direcciones. Después del laminado (*derecha*), la red se alarga en la dirección del laminado y aparece fragmentada en partículas esferoidales. Como resultado de ello, el acero es más tenaz.

granos se desarrollaban hasta un tamaño bastante notable, lo que conducía a una red de cementita gruesa.

La red de cementita adquiría tal consistencia que terminaba por provocar unas marcas visibles en las espadas de Damasco. Pero la cementita arrastraba ciertos inconvenientes. No obstante su dureza, resulta extremadamente frágil a temperatura ambiente. La fragilidad debía aumentar con el grosor de la red, lo que proporcionaría fáciles avenidas para el crecimiento de grietas. Sin embargo, las espadas de Damasco no se distinguían por su fragilidad: eran tenaces. El wootz adquiría tenacidad únicamente después de haber sido forjado y, por tanto, después de romperse la red de cementita con el prolongado martilleo.

Por lo que parece, los aceros de Damasco se martilleaban hasta formar láminas, a una temperatura bastante baja. Los herreros medievales no podían medir de un modo preciso la temperatura en el interior del crisol o en la forja; utilizaban el color del metal como guía. El intervalo de forja para los aceros se extendía desde el calor blanco (1200 grados Celsius) hasta el naranja (900 grados Celsius). Mas el wootz parece haberse forjado a temperaturas entre el cereza (850 grados Celsius) y el rojo sangre (650 grados Celsius). Temperaturas superiores hubieran provocado la disolución de la cementita para transformarse de nuevo en austenita. El martilleo de la pastilla de wootz a una temperatura inferior a los 850 grados rompía la red continua de cementita en partículas esferoidales. Las partículas de carburo cumplían una función: dotar de mayor resistencia al acero, pero como éstas ya no formaban una red continua, el metal no se tornaba frágil.

Las espadas de Damasco dan fe de una buena forja. La altura del lingote parece haberse acortado en un factor de 3 a 8 con el martilleo de la hoja. Los ensayos nos demostraron que los aceros con un contenido en carbono muy alto eran dúctiles y forjables a una temperatura de 850 grados Celsius. Sometimos lingotes con contenidos en carbono de 1,3, 1,6 y 1,9 por ciento a grandes deformaciones; los comprimíamos, en una sola etapa, en un factor de 3. Ningún lingote presentó señal alguna de rotura. Por el contrario, un lingote de fundición, con un contenido en carbono más alto (2,3 por ciento), se volvió más frágil, agrietándose por los bordes bajo la misma deformación.

Una de las razones por las que los herreros europeos se encontraron en tantos aprietos a la hora de pretender reproducir espadas de Damasco, a partir incluso de wootz importado, podía haber estado en su hábito de trabajo; estaban acostumbrados a tratar con aceros de bajo contenido en carbono, que tenían una temperatura de fusión mayor. Intentarían, así, forjar el acero de la India con calor blanco, una vez parcialmente fundido. El resultado de tal esfuerzo fue descrito por Bréant, quien observó que "al calor blanco (los aceros de Damasco) se desmoronan bajo el martillo".

Después del forjado, las hojas de





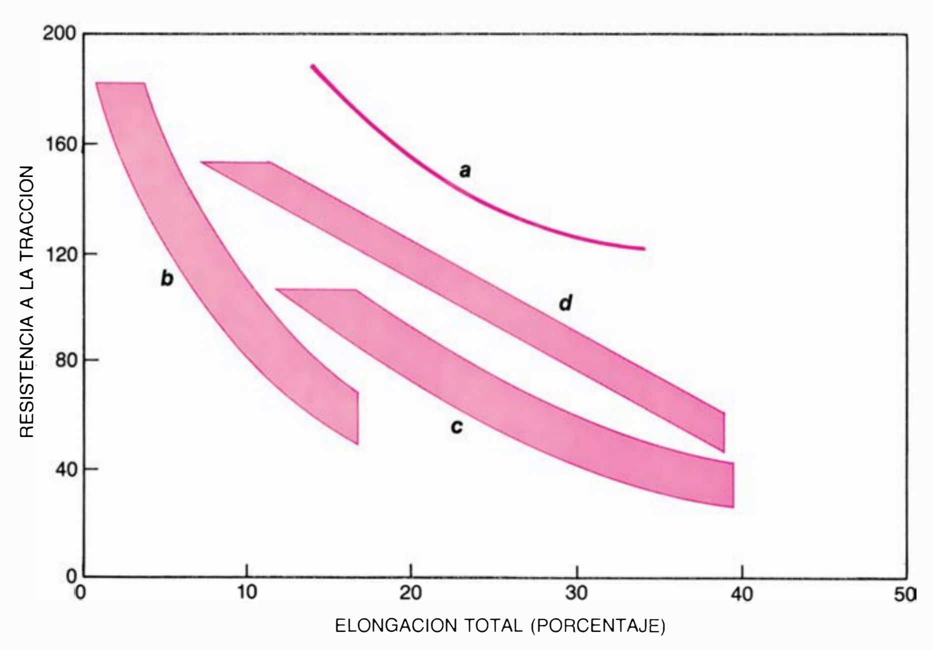
6. SECCIONES GRUESAS de una hoja de Damasco (*izquierda*) y de un acero laminado con un muy alto contenido en carbono (*derecha*) muestran microestructuras similares, lo que sugiere que fueron procesadas de un modo parecido. El trabajo mecánico comprime la red de cementita y el espaciado entre las capas es de unos 100 micrometros. Los aceros laminados presentan un damasquinado menos intrincado.

Damasco se endurecían mediante un tratamiento térmico. El endurecimiento térmico de un acero se consigue calentándolo por encima de los 727 grados Celsius (temperatura a la que la ferrita centrada en el cuerpo comienza a convertirse en austenita centrada en las caras) y luego templándolo (enfriamiento rápido) en agua o cualquier otro medio. Cuando sometemos acero con un muy alto contenido en carbono a un enfriamiento lento a partir de la fase austenita, como en la pieza moldeada del wootz, la austenita se convierte en perlita: capas alternadas de ferrita pobre en carbono y de cementita rica en carbono. Si el acero se templa, no se produce la transformación de austenita en perlita. Los cristales de hierro se convierten en centrados en el cuerpo, si bien son alargados a partir de la forma cúbica hasta una forma tetragonal. Esta estructura, llamada martensita, todavía tiene sitio para contener átomos de carbono, lo que justifica su dureza.

Los herreros medievales siguieron múltiples procedimientos en el tratamiento térmico de las hojas de Damasco, otorgando un peso notable a consideraciones que se le escapan, por inmateriales, al ingeniero moderno. Algunos herreros, por ejemplo, insistían en que las espadas debían templarse en orina de un muchacho pelirrojo o en la de un macho cabrío de "3 años alimentado únicamente con helechos durante 3 días". Una de las descripciones más detalladas de un procedimiento para endurecer el acero de Damasco (*bulat*) se encontraba en el Templo Balgala, Asia Menor: "caliéntese el bulat hasta que no brille, tal como el sol naciente en el desierto, enfríese después por debajo del color de la púrpura real, e introdúzcase en el cuerpo de un esclavo musculoso... la fuerza del esclavo se transfiere a la hoja y es la única que confiere su resistencia al metal".

Las instrucciones pueden interpretarse como sigue. Calentábase la hoja a una temperatura elevada, presumiblemente por encima de los 1000 grados Celsius ("sol naciente en el desierto"); se enfriaba luego con aire a unos 800 grados de temperatura ("púrpura real"). Por último, se templaba en una especie de salmuera caliente (37 grados Celsius).

Este procedimiento, en concreto, no produciría a buen seguro la mejor hoja de Damasco. Calentando la hoja por encima de los 1000 grados Celsius se permitía la disolución de la cementita, convirtiéndola en austenita centrada



7. RESISTENCIA Y DUCTILIDAD de los aceros con muy alto contenido en carbono; pueden ser mayores incluso que las de los mismos aceros convencionales. La resistencia a la tracción es el máximo esfuerzo de tracción que una pieza de metal normalizada puede soportar antes de su rotura. Por elongación, que mide la ductilidad, se entiende la longitud que el metal puede estirarse antes de producirse su rotura. Cuando los aceros con muy alto contenido en carbono (*a*) son laminados durante el enfriamiento para producir una microestructura muy fina, son más fuertes (para una ductilidad dada) que los aceros convencionales con bajo contenido en carbono (*b*) y que los aceros con alto contenido en carbono que poseen pequeñas cantidades de elementos aleantes especiales (*c*). También superan a ciertos aceros avanzados (*d*). La resistencia a la tracción viene dada, arriba, en 1000 libras por pulgada al cuadrado. Recuerde el lector que una libra por pulgada al cuadrado equivale a 6,895 kilonewton por metro cuadrado.

en las caras; enfriando hasta 800 grados Celsius, la estructura gruesa de la red, que habríase eliminado por forja, volvería a aparecer. La elevada temperatura generaría granos de acero bastante grandes. Ambos efectos menguaban la tenacidad de la hoja. Una espada manufacturada de acuerdo con la prescripción de Balgala sería dura, pero también demasiado frágil para resistir el impacto de una hoja que hubiera sido calentada ligeramente por encima de los 727 grados antes del templado. Una hoja así hubiera sido tenaz y dura, a un tiempo.

En general, de acuerdo con la teoría metalúrgica actual, los aceros más fuertes y tenaces son los que poseen los granos y partículas más finos. Por ironía de las cosas, esto sugiere que las mejores espadas de Damasco quizá fueran aquellas a las que les faltaba el damasquinado, su modelo distintivo. Los herreros medievales usaban las marcas superficiales características como una forma de control de calidad. El acero damasquino tenía un alto contenido en carbono, que dotaba de vigor a la hoja, y una estructura bien forjada, que hacía a la hoja más tenaz. El acero damasquino sólo se evidenciaba si las partículas de cementita eran gruesas y se distribuían de una manera irregular. Las hojas cuya microestructura era tan fina que producía marcas superficiales invisibles podrían haber gozado de mayor rigor y tenacidad.

Con objeto de someter a prueba nuestras ideas acerca de la composición y el procesado de los aceros de Damasco, intentamos reproducir el damasquino en el laboratorio. Empezamos por calentar una pieza moldeada de acero, pequeña y cuyo contenido en carbono era del 1,7 por ciento, hasta una temperatura de 1150 grados Celsius (luz amarilla) durante 15 horas. El calentamiento prolongado disolvió el carbono y produjo una austenita muy gruesa. A continuación, enfriamos la pieza moldeada a un ritmo de unos 10 grados por hora. El enfriamiento lento permitió la formación de una red de cementita gruesa y continua en los límites de grano de la austenita.

Por último, recalentamos la pieza moldeada hasta 800 grados Celsius y la laminamos, reduciendo su longitud en un factor de ocho. Esta etapa, que simulaba la forja, alargó los granos en la dirección del laminado y rompió la red del carburo. Cuando el acero era atacado con un ácido que actuaba preferentemente sobre la matriz de hierro, se manifestaban las marcas superficiales a simple vista. La microestructura de la pieza moldeada era notablemente similar a la de los aceros de Damasco.

El procedimiento descrito aquí es una de las vías de fabricación del acero de Damasco; probablemente existieron muchas otras. Los artesanos del Próximo Oriente podían incluso haber trabajado aceros con contenidos en carbono superiores que carecían de damasquinado. Eso fue lo que obtuvimos nosotros en el laboratorio por medio del laminado de la pieza moldeada conforme se enfriaba desde 1100 grados Celsius a través de la fase austenita más cementita. El trabajo mecánico afina los granos de austenita y provoca la precipitación de la cementita a partir de la disolución en forma de partículas distribuidas uniformemente o en forma de una red gruesa. Así, el acero acabado no presenta marcas superficiales.

Tales aceros sin damasquinado y con un muy alto contenido en carbono son más fuertes y dúctiles a temperatura ambiente que los aceros de automoción convencionales. Son, además, superplásticos (es decir, se comportan como la melaza o el vidrio semifundido) a las temperaturas de 600 a 800 grados Celsius. En virtud de ello se puede hechurar con precisión objetos complicados, engranajes por ejemplo, con un mínimo de mecanizado, que suele ser caro, y mediante métodos de trabajo que son adaptables a la producción en serie. Lo que pone sobre la mesa la posibilidad de una extensa aplicación industrial.

No somos los primeros en reclamar el honor del redescubrimiento del perdido arte de Damasco. Además de Bréant y Faraday, nos precedió el ingeniero ruso Pavel P. Anosoff, quien en 1841 publicó una monografía en dos volúmenes titulada *Acerca del Bulat*. Tan entusiasmado estaba Anosoff con sus hallazgos que proclamó: "Nuestros soldados estarán bien armados con espadas de bulat, nuestros labradores labrarán la tierra con rejas de arado de bulat, nuestros artesanos usarán herramientas fabricadas con bulat, y el bulat reemplazará a todo el acero empleado en la manufactura de artículos que se caractericen por su excelente filo y dureza".

Su profecía no se cumplió. El enorme potencial de los aceros con un muy alto contenido en carbono permanece sin explotar. Aunque nuestro optimismo es más moderado que el de Anosoff, creemos que la situación cambiará y el secreto del acero de Damasco será un conocimiento corriente en la industria moderna. En las palabras de un antiguo proverbio ruso: "lo mejor de lo nuevo suele ser lo perdido tiempo ha en el pasado".

Juegos de ordenador

En la conquista de las Mazmorras de Perdición un sistema experto ridiculiza a los mortales

A. K. Dewdney

Miles de personas sufren cada año una imaginaria y fantástica muerte en las Mazmorras de Perdición (*Dungeons of Doom*) jugando al "Pícaro" (*Rogue*), uno de los juegos para ordenador de nueva hornada. Ante sí, en la pantalla, el jugador tiene a la vista un plano de los calabozos, por los que va dirigiendo los pasos de su héroe, el Pícaro. El propósito del juego consiste en descender a través de los 26 niveles de mazmorras y apoderarse del Amuleto de Yendor, para luego regresar sano y salvo a la superficie, mientras por el camino va apropiándose de oro y matando o esquivando monstruos. Pocos son los jugadores humanos capaces de sobrevivir a los peligros de esta odisea subterránea y, no digamos, los que logran regresar con el amuleto.

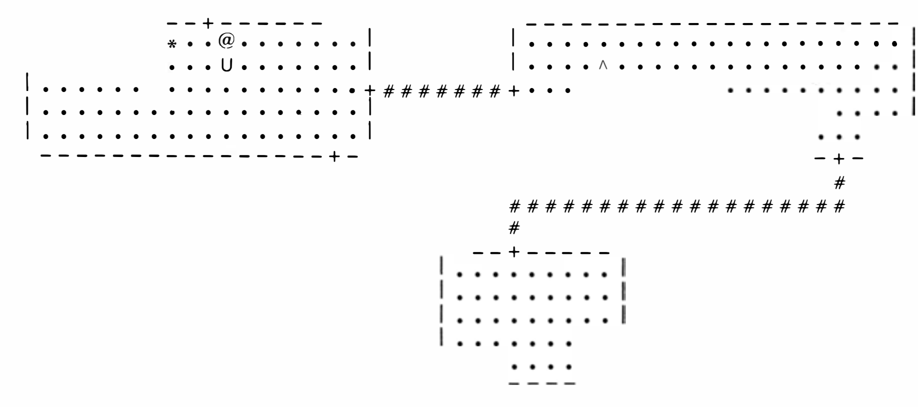
La fantasía puede hacerse muy vívida. Enseguida quedan atrás, fuera del campo de atención, el teclado y la pantalla. Encarnando al Pícaro, me aproximé con no poco nerviosismo a la entrada a las mazmorras. Era de noche y las viejas ruinas que señalaban el punto de mi inminente descenso tenían aspecto lóbrego y repulsivo. Me preparé, sacando mi mazo encantado y un arco y una aljaba de flechas que había arrebatado a un dragón en su guarida de las Montañas Tenebrosas; me revestí de la armadura que los elfos me habían forjado, recogí mis armas y provisiones y comencé a descender peldaño a peldaño por la tétrica oscuridad de una escalinata.

Justo cuando el descenso empezaba a resultar interminable tropecé con una puerta de roble, que entreabrí con cautela. Ante mí se hallaba la primera estancia del más alto nivel de mazmorras, tenuemente iluminada por unos hachones; fui avanzando con tiento hasta el centro de la cámara, para mejor inspeccionarla. Súbitamente, el suelo cedió bajo mis pies y, durante un largo segundo, cortado el aliento, me sentí caer. Con un sordo y mareante batacazo aterricé en otra habitación. Estaba esta otra tan negra como la tinta, y aunque mis ojos se habían hecho a la oscuridad, apenas si podía ver hasta unos pocos palmos en cada dirección. Para empeorar las cosas, podía sentir que algo se movía por la cámara. Con náuseas de terror, tropecé y caí, topándome con un horrendo y cachigordo personaje, protegido con una coraza, que asía una pesada clava. Mientras la alzaba para aplastarme, un latigazo de adrenalina me despejó la cabeza. Con rauda mano ajusté una flecha en mi arco, lo tensé y disparé, casi de un solo movimiento. (Afortunadamente, en mi último curso de licenciatura seguí un seminario de arquería, a pesar de que no contaba para el *curriculum*.) Se oyó el sordo siseo de la flecha al hender el aire, el apagado golpe al clavarse y el alarido del gnomo (tal era la criatura) que caía al suelo estremeciéndose de furia e impotencia. Me alejé a paso vivo, decidido a dar con una escalera de ascenso por la que salir de las Mazmorras. Me vi a mí mismo en mi acogedor hogar, en mi despacho, rematando el incompleto artículo de "Juegos de ordenador".

Conforme avanzaba, tanteando el suelo con los pies, en la dirección que suponía había de llevarme a una escalera, mi bota tropezó con lo que parecía ser un montoncito de piedras. Bajé la mirada. Incluso en la oscuridad, algo relucía. ¡Oro! Sentí la tentación de explorar otra sala más, antes de subir a la superficie...

Aparte la viveza de las emociones que suscita en el jugador, el "Pícaro" va un poco más lejos que los videojuegos de aventuras ordinarios, en dos aspectos cuando menos. Primero, la disposición del terreno de juego la genera el propio programa, y su configuración cambia de una a otra partida. Segundo, el "Pícaro" proporciona al jugador humano una vista en planta del nivel actual de mazmorras explorado hasta el momento [*véase la figura 1*]. Diversas características van siendo indicadas por diferentes caracteres del teclado, trazados en la pantalla. Por ejemplo, las barras y guiones representan muros; los signos de número (#) y de percentil (%) representan, respectivamente, pasillos y escaleras; los signos "más" denotan entradas y, los signos de intercalación (Λ), trampas. Los objetos y características de la cámara pueden o no ser visibles, según que la cámara esté o no iluminada. Cuando el Pícaro penetra en cada nivel, no se muestra en la pantalla rasgo diferenciador ninguno. Para quedar representados en ella, es preciso que el Pícaro (cuyo distintivo es la a de arroba, @) los descubra. De este modo va explorando, cayendo en diversas trampas, reconociendo y examinando diversas salas y recorriendo diferentes corredores. Puede tropezarse con la letra *U*, que representa a un monstruo conocido por Umber Hulk (el Coloso de las Tinieblas).

Debajo de ese plano de signos convencionales, la pantalla nos presenta los datos estadísticos actuales del Pícaro. En la ilustración, nuestro Pícaro ha alcanzado el vigésimoquinto nivel, ha acumulado 7730 piezas de oro, ha ganado 77 puntos (aunque sólo conserva 25, por los daños sufridos), ha reunido fuerzas hasta el nivel 15 (el máximo es 18), va protegido con armadura de clase 9 y su experiencia acumulada suma 30.668 puntos, suficientes para



1. Vigésimoquinto nivel de las Mazmorras de Perdición

ser exaltado al decimotercer lugar entre los veteranos. En el vigésimoquinto nivel de Mazmorras, a este Pícaro le basta bajar una escalera más para llegar al nivel más profundo y tratar de apoderarse del codiciado Amuleto de Yendor. Empero, el Pícaro deberá antes eliminar al Coloso de las Tinieblas.

En esta reseña no hemos comentado sino lo más superficial del juego. Podría escribirse todo un libro de reglas y consejos para jugar al Pícaro. Hasta ahora, el único documento de tal naturaleza es un informe de ocho páginas de tersa prosa. Escrito por Michael C. Toy y Kenneth C. R. C. Arnold, *A Guide to the Dungeons of Doom* se concibió pensando en los usuarios del sistema VAX-UNIX, de tiempo compartido. Me dice Arnold que está disponible ya una versión del Pícaro para el IBM PC, redactada por A. I. Design. Los creadores de "Pícaro", Toy y Arnold, piensan, evidentemente, que el mejor método para aprender es jugar. Sin embargo, pueden esbozarse las líneas generales del juego.

En cada nivel, la zona de juego está dividida en cuadrados. El Pícaro ocupa los cuadrados de uno en uno, al tiempo que va explorando su vecindad. El movimiento a través de cámaras y pasadizos se controla pulsando teclas literales, como *h*, *j*, *k* y *l*, que desplazan al Pícaro un único cuadrado en una de las cuatro direcciones principales. Otros mandos provocan desplazamientos oblicuos, o el movimiento sostenido en un mismo sentido. Para que el Pícaro suba o baje escaleras hay que pulsar el carácter < o el >.

Cuando se descubre algún objeto cercano a la ubicación actual del Pícaro, basta hacer que éste ocupe el cuadro que lo contiene para que automáticamente lo recoja. Si se quiere ocupar el cuadro sin recoger el objeto, se debe pulsar una *m*, seguida del carácter de dirección apropiado. También es posible hacer que el Pícaro pruebe a descubrir trampas pulsando una *s* (de *search*, buscar, explorar), acción que efectúa un examen de los cuadros adyacentes. Nota de aviso: esta inspección sólo tiene probabilidad del 20 por ciento de descubrir alguna trampa.

En ocasiones es preciso dejar descansar al Pícaro (se pulsa un punto), o comer (una *e*, de *eat*) para que recupere las fuerzas perdidas en ir de acá para allá o en someter monstruos. Aparte de unas reducidas raciones que lleva a la espalda, en un macuto, el Pícaro no tiene para comer sino lo que vaya encontrando por los suelos de los calabozos (por poco apetitoso que pueda parecer).

@	Pícaro
−|	muros de salas
+	umbral
#	pasadizo entre salas
·	suelo de sala
%	escalinata
Λ	trampa
)	arma
]	pieza de armadura
*	oro
!	frasco de pócima
?	pergamino mágico
:	comida
/	varita mágica
=	anillo mágico
A-Z	letras mayúsculas, que denotan moradores de las mazmorras

h	avance de un espacio al oeste
j	avance de un espacio al sur
k	avance de un espacio al norte
l	avance de un espacio al este
>	bajar escalinata
<	subir escalinata
m	pasar por encima de algo
s	buscar trampas
Λ	identificar trampas
./e	descansar/comer
W/T	ponerse/quitarse armadura
P/R	ponerse/quitarse un anillo
d	desechar un objeto
q	tragarse una pócima
r	leer un pergamino
z	tocar con la varita mágica
t	arrojar un objeto
w	esgrimir un arma
f	luchar a muerte

2. Signos convencionales de los planos **(izquierda)** *y órdenes* **(derecha)** *del juego del Pícaro*

Cuando descubra alguna pieza de armadura, el Pícaro puede recogerla (colocándola automáticamente en su macuto) o ponérsela (se pulsa *W*, de *wear*). Como es natural, la coraza da al Pícaro mayor protección en el combate, pero ocurre que puede estar encantada. En ese caso, los esfuerzos por quitársela (se pulsa la *T*, de *take off*) serán baldíos, salvo que disponga de un rollo de pergamino mágico con que romper el encantamiento. Cualesquiera anillos mágicos que el Pícaro se encuentre podrá ponérselos (pulsar *P*), o quitárselos (pulsar *R*, de *remove*), a menos que estén encantados.

A veces el Pícaro se ve obligado a desprenderse de una cantimplora y de uno o dos pergaminos (se pulsa *d*, seguida de un carácter denotativo de objeto) porque tiene el zurrón lleno. (Cuando el Pícaro tiene repleto su macuto no puede recoger armaduras.) Empero, antes de desprenderse de un frasco, el Pícaro podría tratar de aprovechar su secreto contenido. Algunas de estas pócimas tienen efectos salutíferos, y le sanan de sus heridas; otras le permiten ver al Monstruo Invisible. Por otra parte, la pócima puede sumirle en total confusión, y así, al pulsar la orden de que vaya hacia el norte, el Pícaro puede marchar errante en dirección arbitraria. De igual manera, puede haber ventaja en leer un pergamino (pulsar *r*, *read*) antes de desecharlo: ciertas fórmulas podrían deshacer el encantamiento de la armadura.

Los más impresionantes artilugios mágicos de que puede disponer el Pícaro son las varitas mágicas. Según el tipo de varita que recoja, el Pícaro puede tocar un monstruo con diversos resultados (para ello se pulsa la *z*, de *zap*). Puede, tal vez, trasladarlo a algún otro lugar, que decide la fortuna; puede lanzarle bolas de fuego, o puede convertirlo en un monstruo de otra especie. Este último tipo de varitas mágicas, llamadas varitas polimórficas, se utiliza de preferencia con los monstruos más horribles: es muy preferible transformar al temible Gusano Púrpura en murciélago que viceversa.

Cuando el Pícaro descubre un monstruo, la mejor táctica suele ser dejarlo en paz. A veces el monstruo está durmiendo, y no atacará de no ser molestado. No obstante, cuando el combate resulte inevitable, uno puede blandir un arma (pulsar *w*, de *weapon*) y luchar (pulsar *f*) después, a muerte. Para ello es preciso antes que el Pícaro se encuentre junto al monstruo. El resultado del combate depende probabilísticamente de factores tales como el nivel de fortaleza que en ese momento posea el Pícaro, su nivel de experiencia y la clase de armadura con que vaya revestido.

Destacado, en primera fila entre la cohorte de jugadores de "Pícaro", sobresale un jugador no-humano del máximo calibre. A lo largo de los cuatro últimos años, un programa de ordenador ha estado jugando y emulando las proezas de los mejores especialistas de "Pícaro", en su azarosa búsqueda del amuleto y del oro. Tenemos así una fascinante oportunidad de ver un "sistema experto" manos a la obra.

El 16 de febrero de 1984, un Pícaro gobernado totalmente por un programa de ordenador combatió o ahuyentó a todos los monstruos, amasó un considerable montón de oro y regresó a la superficie con el amuleto. Bautizado ROG-O-MATIC, este programa dirigió y decidió todos los pasos del Pícaro, todos sus descansos, cada golpe y cada uno de los objetos que arrojó.

ROG-O-MATIC es creación de cuatro estudiantes de segundo ciclo del departamento de ciencias de cómputo de la

Universidad Carnegie-Mellon, de Pittsburgh: Andrew Appel, Leonard Hamey, Guy Jacobson y Michael Maudlin. ROG-O-MATIC enlaza fuentes programadas de conocimientos con sistemas expertos, a fin de decidir qué hacer en cada una de las situaciones subterráneas concebibles.

Cuando un humano prueba su mano en "Pícaro", fluye desde el teclado una corriente de órdenes, que gracias al sistema operativo son transmitidas hasta el programa ROGUE. El programa decide entonces, automáticamente, qué monstruo habrá de encarar el Pícaro a continuación, qué disposición utilizar en el siguiente nivel de mazmorras, y así sucesivamente. El programa ROGUE transmite esta información a través, de nuevo, del sistema operativo, hasta la pantalla, a fin de mantener al humano informado de la situación actual.

Al remplazar al jugador humano, el programa ROG-O-MATIC intercepta el flujo de caracteres emanados del teclado y transmite en su lugar sus propios caracteres, que el sistema operativo se encarga de hacer llegar al programa ROGUE. Este último no tiene ni idea (por así decirlo) de que está jugando con otro programa. Por la misma regla, la información dirigida por ROGUE hacia la pantalla se desvía también hacia el programa ROG-O-MATIC, a fin de que también éste conozca su situación en las Mazmorras de Perdición.

El programa ROG-O-MATIC consta de 12.000 líneas en lenguaje de programación C; es todavía más largo y complejo que el propio ROGUE. La elaboración de ROG-O-MATIC comenzó en 1981, época en que sus primeros creadores, Appel y Jacobson, pensaban que se trataría de un "proyecto sencillo". Al poco de ingresar Maudlin en el grupo, el primitivo programa sufrió una revisión y modificación a fondo, añadiéndose en cada nueva versión alguna nueva mejora de carácter táctico o estratégico. Para cuando el cuarto miembro, Hamey, comenzó a contribuir al desarrollo del programa, los autores estaban comenzando a barruntar que habían creado, en efecto, un sistema experto. Tales sistemas serán una de las aplicaciones clave de los llamados "ordenadores de quinta generación", que se proyecta lleguen al mercado a fines de este decenio. Los sistemas expertos están diseñados para dar cabida en sí, y luego proyectar al exterior, destreza y capacitación propia de humanos, en una variedad de campos, desde la medicina a la ingeniería.

Gracias a que en la programación utilizaron el tipo de organización arquitectónica idónea para la creación de sistemas expertos, los creadores de ROG-O-MATIC pudieron diseñar y modificar su programa con relativa facilidad. En particular, organizaron los tipos de conocimientos y especializaciones que el Pícaro exigía de acuerdo con una jerarquía de diversos subsistemas [*véase la figura 3*].

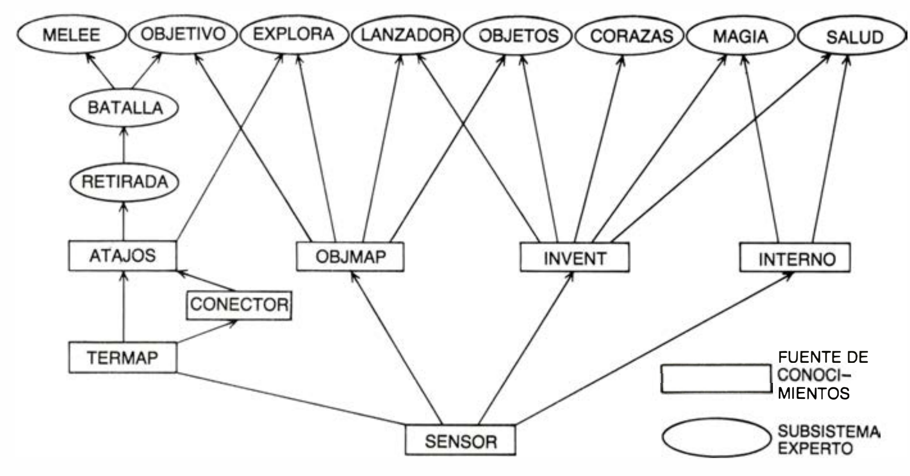
Un sistema experto consta de un conjunto de especialistas. Un especialista de alto nivel (llamado Melée), se encarga de controlar la lucha durante el combate, y otro, también de alto nivel, llamado Objetivo, dirige al Pícaro en la persecución de monstruos. Estos dos especialistas se valen de los servicios de otro, de nivel inferior, llamado *batalla*, que lleva a cabo ataques especiales, o inicia la retirada, de acuerdo con las necesidades de la situación. Ocasionalmente, el experto en batallas pide ayuda al especialista en retiradas, y este último recurre, invariablemente, a una fuente de conocimientos, que llamaremos *atajos*. *Atajos* es un algoritmo especial que explora el terreno de las inmediaciones, y busca el camino más corto que conduzca hasta cualquier ubicación que se le especifique. Los algoritmos de búsqueda de caminos mínimos están, en general, bastante perfeccionados; en esta aplicación concreta sólo es aceptable el más veloz de los posibles, que se utiliza continuamente conforme ROG-O-MATIC explora las Mazmorras de Perdición. Los conocimientos que *atajos* necesita le son facilitados por *terrmap*, que, fundamentalmente, es una estructura de datos donde se han registrado todas las características del terreno que hasta el momento ha ido descubriendo el Pícaro al ir explorando cada nivel de mazmorras. Finalmente, *terrmap* obtiene todo su conocimiento de *sensor*, una estructura de datos de bajo nivel, que contiene toda la información significativa emanada del programa ROGUE.

Antes de enumerar los deberes y funciones de los otros especialistas y fuentes de conocimientos, quisiera examinar con más detalle uno de los especialistas, el denominado *batalla*. Una vez en curso una batalla, el experto en refriegas, Melée, consulta al especialista en batallas si debe atacar o retirarse. Por ser la discreción el principal componente del valor, el especialista en batallas determinará primero si la retirada es factible y deseable. Para ello, tiene primero que verificar si se dan ciertas condiciones previas:

1. El Pícaro no está en ese momento bajo los efectos de la pócima de la confusión (que podría hacer que, en lugar de retirarse, el Pícaro se echase directamente en brazos del monstruo).
2. El Pícaro no está en ese momento firmemente asido por ningún monstruo.
3. Es posible que el Pícaro muera en uno de los lances de la refriega (en tal caso, sería muy deseable evitar el conflicto).
4. El especialista en retiradas es capaz de hallar una ruta de huida (la retirada es posible).

De darse los cuatro prerrequisitos anteriores, ROG-O-MATIC trasladará la cuestión al experto en retiradas, para que resuelva la retirada del Pícaro. De no ser así, el especialista en batallas consultará una lista de posibilidades agresivas.

1. Si es posible que muera el Pícaro en uno de los lances de la refriega, si el monstruo está próximo al Pícaro, y es visible, y si se da la circunstancia de que el Pícaro dispone de una varita teletransportadora, tóquese al monstruo con la punta de la varita.
2. Si es posible que muera el Pícaro en uno de los lances de la refriega, si el



3. Fuentes de conocimientos y subsistemas expertos del programa ROGUE

monstruo está cercano al Pícaro y, disponiendo el Pícaro de un pergamino de teletransporte, léase la fórmula mágica del pergamino.

Si en un encuentro no prevalece ni una ni otra condición, no queda más alternativa que enfrentarse al monstruo, durante un asalto cuando menos, y así, ROG-O-MATIC lanza animosamente su Pícaro al combate. Tal vez tenga fortaleza suficiente para resistir por lo menos un asalto en la refriega. Si no, puede resultar muerto.

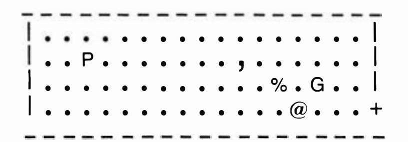
Entre otros expertos, el programa cuenta con un especialista en exploraciones (*explora*), que decide dónde explorar a continuación y qué movimientos efectuar. Cuenta también con un especialista en proyectiles (*lanzador*), que tiene a su cargo el lanzamiento de flechas, piedras, lanzas y demás armas arrojadizas, contra los monstruos; con otro especialista (*objetos*) que decide qué objetos se deben recoger; con un experto en corazas, para decidir cuáles portar; otro especialista en artes mágicas, y otro, llamado *salud*, que determina cuándo hay que comer o descansar. *Objmap* es una estructura de datos que lleva control de la ubicación e historia de todos los objetos encontrados hasta el momento; *invent* es un inventario del contenido del macuto del Pícaro, e *interno* es un supervisor del estado interno del Pícaro, que vigila su capacidad y disposición para acometer esfuerzos.

No puede sorprendernos que ROG-O-MATIC sea capaz de jugar al "Pícaro" con gran rapidez. Al cabo de pocos minutos de juego computarizado, todo ha terminado, en un sentido o en otro. Hasta la fecha, el programa ha jugado, contando sólo en Carnegie-Mellon, más de 12.000 partidas de "Pícaro"; los datos estadísticos citados por los creadores de ROG-O-MATIC parecen respaldar su pretensión de que, en la actualidad, el programa supera en capacidad de juego a la mayoría de los especialistas humanos. Por ejemplo, en una prueba llevada a cabo en Carnegie-Mellon en 1983, a lo largo de tres semanas, la mediana de las puntuaciones de ROG-O-MATIC fue superior a la de cualquiera de los quince mejores jugadores de "Pícaro" de la universidad. Al tiempo que desbanca en rendimiento a casi todos los humanos, ROG-O-MATIC da muestras, en comparación con ellos, de algunas chocantes diferencias de estilo de juego. Según Maudlin, se trata de un programa precavido, cuidadoso y nada imaginativo. Exhibe una gran eficiencia al explorar, evitando, concretamente, todas las redundancias de búsqueda que con tanta frecuencia cometen los humanos. Su estilo de combate, sin embargo, es bastante rutinario, y si no le sonríe la suerte, hace notar la falta de las cualidades de esgrima que ofrece el juego humano.

Fijémonos, por ejemplo, en la importancia del factor suerte en la histórica partida del 16 de febrero de 1984, que tuvo lugar en la Universidad de Austin, en Texas. Tras superar los increíbles peligros de los niveles más profundos de las Mazmorras de Perdición, el Pícaro (bajo la dirección de ROG-O-MATIC, claro está) encontró el Amuleto de Yendor en un pasadizo del vigésimosexto nivel. En su veloz carrera hacia la superficie, el Pícaro se tropieza en el vigésimosegundo nivel con uno de los más temibles inquilinos de las mazmorras, un dragón de flamígero aliento. Aunque el Pícaro desenvainó la espada, el dragón pudo lanzarle antes una bocanada de fuego. La llamarada no llegó a alcanzar al Pícaro, que en aquel momento se encontraba de pie en el umbral de una cámara, sino que chocó contra una pared y rebotó contra el dragón, provocándole quemaduras de importancia. Con las fuerzas que aún le restaban, el dragón se dirigió contra el Pícaro, quien le dio muerte de un mandoble, con la espada. El Pícaro prosiguió después su ascenso hacia la superficie, dando cuenta por el camino de monstruos menos importantes. Cuando alcanzó a salir a la luz del día, tenía en su posesión no sólo el amuleto, sino también 6913 piezas de oro, amén de otros objetos.

Si el lector siente curiosidad por la descripción precedente, tal vez quiera participar en el juego. A tal objeto, Maudlin ha preparado el rompecabezas que vemos más abajo. Además de servir de introducción a los goces del "Pícaro", permite comprender la dificultad de imbuir inteligencia al programa ROG-O-MATIC.

Una de las cámaras del nivel 26 de las Mazmorras de Perdición está en este momento ocupada por el Gusano Púrpura (*P*), el Griffin (*G*) y el Pícaro (@). El Amuleto de Yendor (,) se encuentra en el extremo más distante del Pícaro de una escalinata (%).



El objetivo del Pícaro es hacerse con el amuleto y echar a correr escaleras arriba, sin caer muerto. Se da la circunstancia de que al Pícaro sólo le queda un punto, y no puede arriesgarse a una confrontación ni con el Gusano Púrpura ni con el Griffin. Por fortuna, el Gusano Púrpura está profundamente dormido, y el Pícaro, que lleva puesto el Anillo Furtivo, lo único que tiene que hacer es no pisarlo para que no se despierte. Por otra parte, el Griffin está perfectamente despierto y dispuesto a perseguir al Pícaro. Aunque el Griffin nunca se atrevería a despertar a uno de los monstruos colegas, le gustaría mucho ocupar la misma posición que el Pícaro, a quien desmembraría con un solo zarpazo de sus crueles garras.

Le toca mover al Pícaro. Cada movimiento del Pícaro o del Griffin le permite pasar a cualquiera de las ocho casillas adyacentes. Empero, el Griffin es tan simplón que opta siempre por mover según el camino más corto hacia su presa. Si el Pícaro se dirige a la escalera, estará a salvo del Griffin y del Gusano Púrpura. En efecto, los convenios intersindicales prohíben a los monstruos invadir los niveles de otros.

El artículo de enero pasado, acerca de la Torre de Hanoi y de las Argollas Chinas, trajo consigo amplia variedad de respuestas, de carácter que va desde matemático hasta metafísico. Diversos lectores ofrecieron soluciones sencillas, no recurrentes, para los rompecabezas; entre ellos, Edward T. Price, de Eugene, Oregon. Price sugiere pintar alternativamente de dos colores, negro y blanco, por ejemplo, los aros de la Torre, por orden de tamaño creciente. El rompecabezas se resuelve entonces rápidamente, sin más que añadir a las reglas primitivas la regla nueva siguiente: nunca colocar un disco sobre otro del mismo color. No queda entonces elección acerca de dónde hay que ir colocando cada uno. El correspondiente problema, con las argollas chinas, fue resuelto por Morris S. Samberg, de Howard Beach, Nueva York. Consiste en ir alternando entre mover (hacer correr hacia adentro o afuera) el primer aro, y mover algún otro aro. Sólo puede moverse en cada ocasión un único aro distinto del primero. Cuando el número de aros es impar, se comienza con el primer aro; si no, se empieza por el otro. Robert Hardy, de Dayton, Ohio, resume esta sencilla solución en el siguiente poemita:

Una solución iterativa
quita la gracia al problema:
cambie la argolla de arriba
y alterne con otra cualquiera.

Ningún lector logró dar un esquema matemático sencillo que explicase el

plan de ordenación de los hexagramas de *I Ching* debido al Rey Wen. Muchos lectores observaron que los hexagramas están emparejados por columnas de modo sencillo; pero ello mal puede explicar la ordenación total del conjunto. No obstante, Homer E. Brown, consejero de ingeniería eléctrica de Cary, Carolina del Norte, ofreció un análisis bastante sugestivo: a partir de cada hexagrama se cuentan hacia arriba o hacia abajo 10 hexagramas, saltando, si es necesario, desde el pie de una columna al comienzo de la siguiente. El hexagrama al que se llega de este modo tiene siempre relación sencilla con el hexagrama de partida. La regla, empero, no es determinística, porque nunca se sabe si será preciso contar hacia arriba o hacia abajo.

A pesar de esta aparente relación (que, en cualquier caso, tiene cierto número de excepciones), yo me inclino a pensar que la disposición del Rey Wen obedece a principios metafísicos. La tendencia a proyectar nuestras actuales preocupaciones de carácter científico y tecnológico en culturas pretéritas produce imágenes distorsionadas de lo que en tiempos pudo suceder. Por regla general, los sistemas "científicos" que otrora existieron cumplían un papel estrictamente subsidiario junto a una visión, en gran medida religiosa, del mundo. Opiniones parecidas ofrece Bernard X. Bovasso, de Saugerties, Nueva York. El *I Ching* se ocupa de la ordenación del tiempo, sostiene Bovasso, y lo mismo le ocurría al Rey Wen. David White, un filósofo del Macalaster College de Saint Paul, Minnesota, aludió a una traducción de *I Ching* debida a James Legge [véase "Bibliografía"]. Un apéndice de dicha obra plantea los principios metafísicos que gobiernan la totalidad de la ordenación de los 64 hexagramas. Los tres primeros, por ejemplo, están conectados, respectivamente, con las ideas de cielo, tierra y caos. El hexagrama del caos, que denota lo que se considera como el desorden de todas las cosas creadas, tomadas colectivamente, va a continuación del cielo y la tierra, porque todas las cosas creadas llenan el espacio que media entre el cielo y la tierra.

Los lectores que hayan intentado resolver el problema de persecución planteado en el artículo sobre peces y tiburones del mes de febrero quizá se hayan enmarañado en complicaciones innecesarias. La retícula oceánica que contiene los tres peces y los dos tiburones es de 9 por 9; debería haber sido de 9 por 10. Añádase por tanto una columna más a la retícula.

Taller y laboratorio

Fantasmas y fenómenos asociados a nuestras postimágenes positivas

Jearl Walker

Adapte su vista, durante 10 o 15 minutos, a las tinieblas de una habitación cerrada y sin luces y, luego, haga refulgir un destello luminoso intenso. Mientras éste se mitigue, mantenga la vista inmóvil. Entonces, antes de dos o tres segundos, verá algo parecido a una foto instantánea de la estancia, pero percibiendo unos detalles que, antes, no le permitió apreciar el deslumbramiento. He aquí lo que a veces se conoce como imagen residual y, más corrientemente, como postimagen (con el calificativo de positiva, pues reproduce las zonas claras y oscuras de la escena iluminada). Manteniendo quietos los ojos, perdura décimas de segundo.

Mi primera noticia de este tipo de postimágenes la debo a Peter Hasselbacher, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Louisville, quien ya las había observado en algunas fiestas durante sus primeros años de universidad. Una de las referencias más tempranas a este fenómeno data de 1894 y se debe a Shelford Bidwell, físico británico que investigó la visión humana. Cuando él iluminaba un objeto con el destello de una descarga eléctrica, unos 0,2 segundos después percibía una postimagen del mismo, la cual, a veces, se desvanecía y reaparecía repetidamente.

En otra de sus experiencias, Bidwell puso a girar un tubo de descarga gaseosa a razón de 0,4 vueltas por segundo. El tubo lo iluminaba periódicamente con un destello. Así, cuando observaba esa rotación con la vista fija y no acompañándola con los ojos, al tubo parecía seguirlo una especie de luz fantasmagórica de color azul o violeta pálido. Cuando cesaba la rotación, aquella luz alcanzaba el tubo. Desde entonces, las postimágenes observadas por Bidwell en sus experimentos reciben el nombre de fantasmas de Bidwell.

Otra de las operaciones de Bidwell consistió en iluminar un orificio practicado en un disco giratorio, de suerte que, sobre una pantalla situada al otro lado del mismo, se moviera en círculo un punto luminoso; por lo demás, la sala permanecía en la penumbra. Pudo así percibir un fantasma que seguía al punto con un retraso de 0,2 segundos. Cuando la luz original era blanca, azul o verde, el fantasma era violeta; si anaranjada o amarilla, el fantasma se tornaba azul o azul verdoso. La luz roja, empero, no producía fantasma.

En 1934 William Stewart Duke-Elder, cirujano y oftalmólogo, describió de qué modo producir una postimagen en un observador que mire a una mancha luminosa con una tarjeta que le obstaculice la vista. Al mover rápidamente la tarjeta tapando y destapando la visual del observador, éste percibe una postimagen de la luz. “Tan vívida, verdaderamente, puede ser la impresión de la postimagen original”, escribió Duke-Elder, “que la tarjeta parece transparente y hay detalles que no se advirtieron al mirar la luz y que llaman la atención en la postimagen”.

He estado investigando el fenómeno con la ayuda del flash electrónico de mi cámara fotográfica. Tras permanecer algunos minutos en una cámara oscura (mucho antes mis ojos se habían adaptado a la oscuridad) abrí una revista sobre la mesa. Las tinieblas en la habitación eran tan espesas que no se veía absolutamente nada. Coloqué el flash a un lado de mi cabeza, de modo que apuntara hacia la revista, y lo disparé. (Cuidé bien de no apuntarlo directamente a mis ojos, pues a esa proximidad la luz puede dañar la retina.) El fulgor me deslumbró, pero no me impidió vislumbrar el contorno general de las páginas de la revista.

Segundos más tarde apareció una postimagen positiva de la revista. (Que yo llamo postimagen instantánea.) Aquella imagen se me presentó con suficiente claridad para distinguir las fotografías y leer los titulares. “Veía” los caracteres más pequeños, pero no conseguí leerlos. La imagen comenzó a emborronarse y desvanecerse, desapareciendo tras 15 segundos. Las primeras zonas que desaparecieron fueron las más oscuras (las fotos); las menos tupidas lo hicieron en último lugar.

Seguidamente surgió una postimagen negativa, más vaga y persistente, donde las zonas claras y oscuras aparecían intercambiadas. Opino que esta postimagen negativa es consecuencia de la fatiga retiniana que produce la postimagen instantánea. Las zonas claras de la escena iluminada crean una gran actividad en las zonas de la retina en las que caen sus imágenes; cuando esa actividad se extingue, aquellas zonas parecen oscuras en comparación con las áreas cuya actividad fue inferior. De ahí que la postimagen positiva se transforme progresivamente en una negativa.

Proseguí con los destellos del flash para examinar las postimágenes instantáneas durante la media hora siguiente. A lo largo de los primeros 15 minutos su calidad mejoró sin cesar a medida que mi vista se adaptaba a la oscuridad. Las postimágenes, tanto las instantáneas como las negativas, eran incoloras, pese a que los objetos presentes fueran de colores. Llegó un momento en que la postimagen instantánea se hizo tan vívida que traté de caminar por la habitación cual si realmente pudiera ver. Lo dejé cuando topé con el canto de una puerta abierta que me parecía estar distante.

El mejorar la calidad y la duración de la postimagen instantánea necesitó de cierta práctica, pues el flash me hacia parpadear. Y un parpadeo, o el mover los ojos de un lado a otro de la escena, acostumbraba a debilitarla o a borrarla. El movimiento de mi cabeza parecía no afectarla, siempre que los ojos no los moviese de una manera brusca con respecto a la cabeza.

La fijeza de mi vista durante la postimagen la aseguré mirando a una pantalla de televisión apagada. El destello luminoso hizo que ésta brillara pálidamente. Percibí entonces la pantalla brillante sobrepuesta a las postimagen instantánea del receptor apagado. Ambas imágenes se separaron lentamente, lo que revelaba que, en la oscuridad subsiguiente al destello, yo había inconscientemente dejado vagar mis ojos, sin que ello afectara a la postimagen, la cual se me aferró a la retina.

En casi todo lo escrito acerca de este tipo de fantasma de Bidwell se afirma que, para que se mantenga la postimagen, debe inmovilizarse la vista. Con algunos ensayos he descubierto que la fijeza de la mirada no suele ser crucial en las primeras fases de la postimagen. Así, al mover los ojos durante el destello o a los pocos segundos de éste, la postimagen desaparece pero retorna enseguida, manifiestamente tan nítida como si hubiera mantenido la vista in-

móvil. Pero si los muevo después, desaparece al instante y para siempre. Nadie ha podido explicar por qué un tal movimiento de ojos borra la postimagen.

La postimagen negativa resultó mucho menos frágil, y aparecía aun cuando no fijara la vista. Normalmente persistía varios minutos. En ocasiones, si producía un destello para generar otra postimagen instantánea, a ésta se sobreponía una postimagen negativa precedente.

A menudo la percepción de una postimagen instantánea contradecía mi sentido común. Iluminé la mano derecha mientras la mantenía delante de la cara y entonces me la llevé a la espalda. Cuando apareció la postimagen instantánea, percibí con toda nitidez que la mano la tenía delante, pero con una claridad igual la sentía a mi espalda.

En otra experiencia me puse en cuclillas, mirándome los pies y al suelo, mientras disparaba el flash. Me incorporé entonces, sin apartar la mirada del suelo. La postimagen instantánea me convencía de tener la cabeza cerca de los pies, pero yo sabía que estaba erguido.

Al hacerlo al revés, la cosa resultó igualmente inquietante. Lancé el destello hacia el suelo encontrándome en posición erecta. Antes de que apareciese la postimagen me puse en cuclillas. Así, el contraste entre lo que percibía y lo que sentía fue desconcertante. Tan turbadora resultó una postimagen instantánea de mi cara al mirar a un espejo durante el destello.

Disparando el flash dos veces con un intervalo de dos o tres segundos logré superponer dos postimágenes instantáneas. En una experiencia coloqué la mano delante la cara, mientras producía el destello. Inmediatamente trasladé la mano a la derecha y volví a disparar. Cuando aparecieron las dos postimágenes, vi las dos posiciones de mi mano. Yo sabía que aquellas manos eran mías, pero las imágenes carecían de sentido porque entonces yo tenía la mano en el costado. Al mantener la mano con la palma enfrentándoseme en un destello, y con el dorso hacia mí en el otro, pude contemplar una extraordinaria mano de 10 dedos, la mitad de ellos curvados hacia mí y la otra mitad curvados en sentido opuesto.

Seguidamente me senté cruzando la pierna derecha sobre la izquierda. Con la cabeza inclinada las iluminé con un destello. Rápidamente volví a cruzarlas del modo inverso y las iluminé de nuevo. En la postimagen consiguiente una pierna aparecía extendiéndose hacia la izquierda y la otra extendiéndose hacia la derecha.

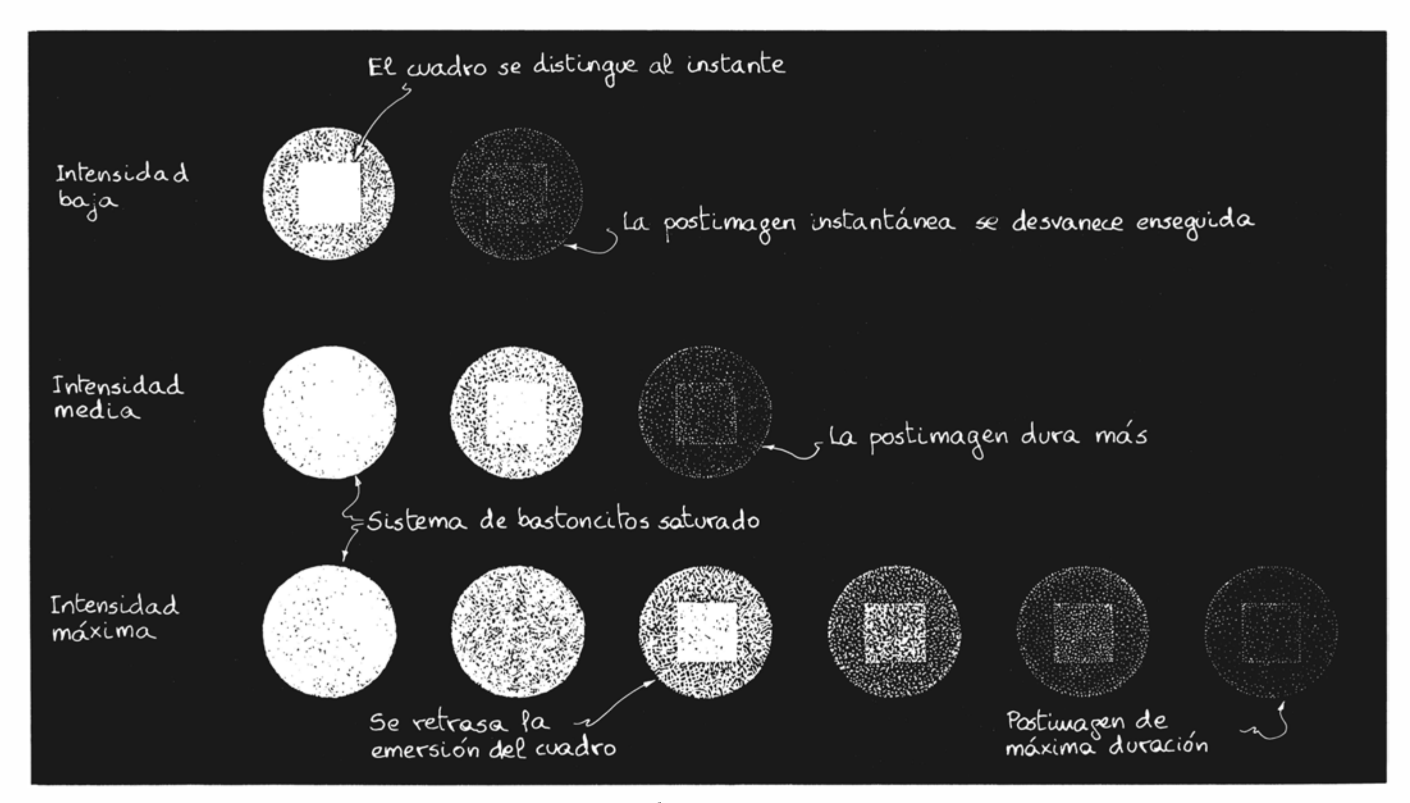
Esta capacidad para superponer postimágenes instantáneas me permitió inmovilizar estroboscópicamente un objeto que se moviera en mi campo visual. Sujeté una moneda por el canto, la solté y, entonces, disparé dos veces mientras caía. En la postimagen vi mi mano y dos posiciones de la moneda.

Me pregunté entonces si una postimagen de un ojo se superpondría a una postimagen del otro. Disparé así el flash abriendo sólo el ojo izquierdo. Luego cerré ese ojo, abrí el otro y volví a disparar. Ambas imágenes se superponían, en efecto.

Al mover la cabeza entre un destello y el siguiente, la escena se me ofrecía demasiado embrollada para que pudiera reconocerla con claridad. A veces creé dos imágenes que fusioné para provocar un leve efecto estereoscópico. En la estereopsis normal se produce una sensación de profundidad correcta, porque el cerebro está acostumbrado a la separación real de los ojos. Pero en mis experiencias, los ojos captaban con una separación diferente, lo cual originaba una percepción de profundidad distinta.

Para verificar la dependencia cromática en las postimágenes instantáneas, ensayé con varios filtros de celofán. Para ello cubrí el flash con un filtro, aunque muy bien pudiera también haber mirado a través suyo. Con filtros verdes y azules las postimágenes eran vívidas. Con filtros rojos, eran pálidas y breves, o bien no aparecían en absoluto.

Me puse a investigar entonces el fantasma de Bidwell para una mancha de luz en movimiento. Para ello, con la

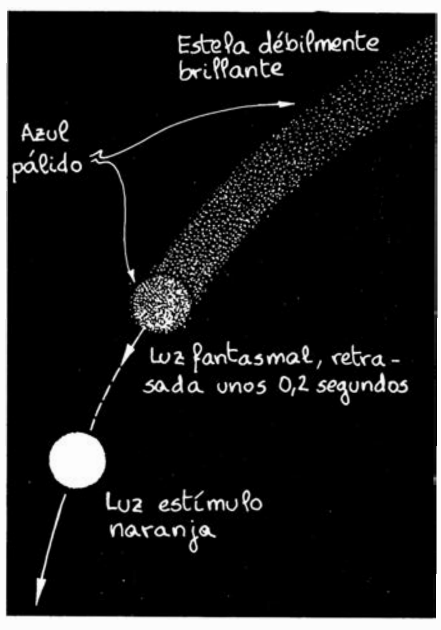


1. Variaciones de una postimagen positiva

mirada fija, moví una pequeña mancha de luz naranja (el disparador del flash de mi cámara) a través de mi campo visual. Con un retraso notorio una mancha azul pálido empezó a recorrer el mismo trayecto, confundiéndose con la mancha naranja en el punto donde yo detuviera ésta. El fantasma dejó una estela que brilló apagadamente (quizá fuese verde, pero no pude asegurarme) durante décimas de segundo. Cuando moví la luz naranja según un camino intrincado, el fantasma recorrió el mismo trayecto, dejando en todo éste un brillo amortiguado.

Si el fantasma se debiera exclusivamente a la persistencia de la visión, aparecería a la vez que la luz estímulo, y brillaría el trayecto inmediatamente posterior a ésta. Por ello, el fantasma es una postimagen. Cuando la mancha luminosa se traslada por el campo visual, su imagen sobre la retina se mueve a través de fotorreceptores que antes no estaban iluminados. Esta súbita transmisión de luz induce la postimagen, pero no sin un leve retraso. Si con la vista se sigue el trayecto de la luz estímulo, siempre estarán iluminados los mismos fotorreceptores y no aparecerá fantasma alguno.

De vuelta a mi flash fotográfico, iluminé una página de texto con el ojo izquierdo cerrado. Me esmeré en fijar la vista hacia el lado izquierdo del papel. Al contemplar la postimagen instantánea con ambos ojos, noté que la imagen era más deficiente por el lado izquierdo. En la visión normal, todo objeto al que se mire produce una imagen sobre la fóvea, que es una reducida zona de la retina densamente ocupada por conos. Esta zona carece de bastoncitos, el otro tipo de fotorreceptores.



2. El fantasma de Bidwell

Como la postimagen instantánea de la página aparecía poco clara en la zona enfocada por mi ojo, concluí que eran los bastoncitos los que debían producir la postimagen.

Pero en una postimagen debe haber otro lugar borroso. Hacia el lado de la sien del campo visual se encuentra el punto ciego, lugar de la retina por donde el nervio óptico penetra en el ojo. Esta zona, carente de fotorreceptores, no puede transmitir imágenes al cerebro. En la visión normal el punto ciego pasa inadvertido porque la región que no vea un ojo la verá el otro. Pero, en mi caso, cuando expuse un solo ojo a la página brevemente iluminada, confié en que hubiera una zona confusa del lado de mi sien. En ocasiones, creí percibirla, pero nunca estuve seguro del todo.

A veces remplazaba el flash por un estroboscopio corriente ajustado a baja frecuencia. Tras uno o dos destellos lo apagaba para examinar la postimagen. (No hay que mirar directamente a un estroboscopio de destello. Su luz puede ser suficientemente intensa hasta dañar los ojos. Quien sufra de ataques ante la visión de luces centelleantes debe evitar estos aparatos.)

Para una experiencia generé una postimagen instantánea con mi flash, cerré los ojos y luego encendí el estroboscopio durante unos 30 segundos. A cada destello, la luz me atravesaba los párpados, creando un fondo rojo difuso (rojo a causa de la sangre de los párpados). Contrastando con el fondo percibí una imagen negativa de la escena que había sido iluminada por el flash. Cuando apagué el estroboscopio, me sorprendió descubrir una postimagen instantánea mucho después de que ésta debiera haber desaparecido.

Experimentando más comprobé que esta técnica prolongaba la postimagen instantánea. Desconozco la razón, pero les puedo ofrecer dos hipótesis. Quizá la luz difusa que se transmite a través de los párpados refuerce las transformaciones químicas inducidas por el destello inicial y las haga más persistentes. Otra posibilidad es que lo que se percibe tras apagar el estroboscopio sea una postimagen contraste de la postimagen negativa que, de otro modo, se presentaría. Ahora bien, como el contraste a una imagen negativa es una positiva, se percibe una postimagen instantánea al apagar el estroboscopio.

Hay experimentos clásicos en torno a otros tipos de postimágenes en los que el observador puede variar su apreciación del tamaño de una postimagen cuando contempla a ésta sobre un fondo situado a una distancia variable. Supongamos que el sujeto perciba un objeto que ocupe un arco de un grado en su campo visual. El tamaño que le atribuya lo determinará en parte la distancia aparente entre ambos. Así, si hay indicios suficientes que lo convenzan de que está lejos, concluirá que el objeto es grande. Y si los indicios lo convencen de que está cerca, concluirá que es pequeño.

He tenido, vagamente, la impresión de acercarme al modo en que la postimagen instantánea puede depender de tales indicios. En una habitación poco iluminada lancé el flash sobre una lata de conservas. Luego me coloqué una hoja de papel delante de los ojos. Con ello, la postimagen instantánea de la lata se superpuso a una imagen confusa del contorno del papel. Cuando alejé éste, la lata pareció aumentar un tanto su tamaño. Este experimento fue difícil, ya que el observador tiende a enfocar la vista en el papel y este movimiento de los ojos borra la postimagen.

Otras investigaciones sobre las postimágenes instantáneas sugieren que tales variaciones en el tamaño apreciado de un objeto pueden darse en una oscuridad absoluta. Cabe suponer que el sujeto altere su apreciación del tamaño conforme desplaza la mano (que no ve en la oscuridad) desde delante de sus ojos hasta toda la longitud del brazo. Sospecho que se atribuye a la mano el papel de plano en el que se ve la postimagen, aunque sólo sea como sensación. No he conseguido crear esta ilusión.

La postimagen positiva posterior a un destello fugaz la ha investigado recientemente Edward H. Adelson, del Centro de Investigaciones David Sarnoff de la RCA, inspirándose en los trabajos independientes de Barbara Sakitt, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Wilson S. Geisler III, de la Universidad de Texas, Austin. Adelson atribuye la postimagen a los bastoncitos de la retina. En sus experimentos expuso a un observador adaptado a la oscuridad ante un cuadrado verde sobre un fondo constituido por un círculo rojo. La duración del destello era de 0,1 segundos. El cuadrado ocupaba 4,5 grados en el campo visual del observador y, el círculo, 11 grados. Ambos los descentró unos 15 grados respecto a la visual del observador, para que en la retina dieran una imagen bien alejada de la fóvea.

La postimagen resultó depender de la intensidad de la luz. En la figura 1 se representan algunos de los resultados. La hilera de arriba es una secuencia de las impresiones del sujeto cuando la intensidad era baja. El cuadrado se hizo

visible de inmediato, al menguar el resplandor del flash, y la postimagen fue fugaz. La segunda hilera, secuencia resultante de una intensidad media, revela un breve retraso antes de que pudiera distinguir el cuadrado. Aquí la postimagen duraba más.

La secuencia de la hilera de abajo se debe a una iluminación intensa. En este caso pasaron varios segundos antes de que el cuadrado destacara sobre el fondo. Y la postimagen duró más que las anteriores. Es evidente que la capacidad del sujeto para distinguir porciones de la postimagen se retrasa cuando se incrementa la intensidad del destello. Tal incremento produce además una postimagen más duradera.

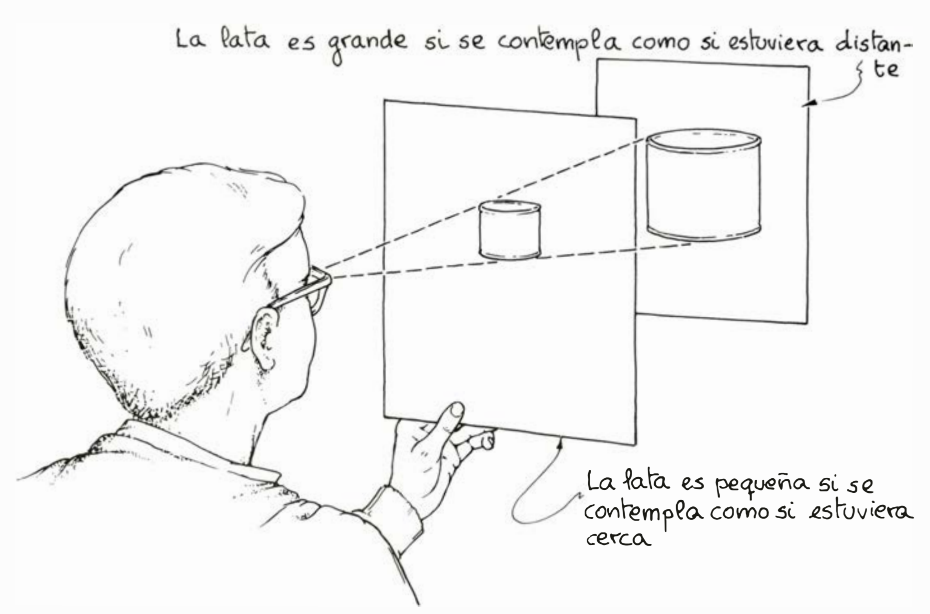
Adelson descubrió asimismo que ambos motivos pueden parecer brillar cuando el cuadrado emerge del fondo. Todas estas observaciones las he repetido yo en mis experiencias con postimágenes instantáneas de cubiertas y páginas de revistas.

Adelson sugiere la manera en que el sistema de bastoncitos puede saturarse con un destello. Cuando el segmento externo de un bastoncito absorbe luz, una serie de reacciones químicas generan una sustancia que bloquea el flujo de iones sodio a través de una membrana existente en dicho segmento. Cuando ese flujo se bloquea por completo, la señal que se manda al cerebro alcanza su máxima potencia y se dice que el bastoncito está saturado. En tal estado no hay luz adicional que aumente la señal.

Por ello el destello inicial puede saturar el sistema de bastoncitos de modo que la señal, procedente de los bastoncitos, estimulada por el cuadrado sea tan fuerte como la estimulada por el fondo. Pero cuando estas señales aminoran, acaban por diferir en potencia y permiten, así, que el observador distinga el cuadrado. Cuando el destello es intenso, el sistema de bastoncitos permanece más tiempo saturado y se retarda la emersión del cuadrado.

Adelson realizó una serie de experimentos encaminados a comprobar la dependencia cromática de la postimagen positiva. Para ello utilizó constantemente un fondo rojo-naranja con cuadrados de colores diversos. En cada ensayo el observador ajustaba la intensidad del cuadrado de modo que, en la postimagen, aquél apenas se distinguiera del fondo.

Al plasmar luego en una gráfica las intensidades elegidas en función de la longitud de onda del color del cuadrado, la curva era semejante a la de sensibilidad de los bastoncitos a las distintas longitudes de onda, lo que delató a



3. Variaciones en el tamaño aparente de un objeto en una postimagen

éstos como responsables de la postimagen.

En otros ensayos Adelson mantuvo un cuadrado de color verde constantemente sobre un fondo de color variable. En esta ocasión el observador ajustaba la intensidad del fondo hasta que el cuadrado empezara justamente a hacerse visible en la postimagen. Nuevamente la gráfica de los resultados coincidió con la de sensibilidad de los bastoncitos frente a la longitud de onda.

¿Son también responsables los bastoncitos del fantasma que arrastra una luz estimuladora en movimiento? Yo creo que sí, pero me despista el color del fantasma.

Puedo sugerirles una respuesta. El color del fantasma puede ocasionarlo la interferencia de los bastoncitos con la señal cromática de los conos durante la postimagen. (Los bastoncitos no pueden emitir directamente señales cromáticas, pero los conos sí.) La observación de Bidwell acerca de que una luz roja estimuladora no genera fantasma sea probablemente atribuible al hecho de que a los bastoncitos no los excita el color rojo oscuro. Por consiguiente, un estímulo así no creará en éstos la actividad química generadora de fantasmas.

Una luz estimuladora de cualquier otro color excitará los bastoncitos y éstos generarán una postimagen. Su actividad inhibirá la señal cromática (todavía débil, aunque real) de los conos que fueron excitados por la luz estímulo. Esta inhibición mandará, entonces, al cerebro la señal de que los conos están interceptando el color complementario de la luz que sirve de estímulo.

Supongamos que esta última sea amarilla. Excitará, pues, los bastoncitos y los conos destinados a detectar el amarillo. O sea, cuando la luz pase por encima de una zona ocupada por tales conos se percibirá el amarillo.

En un lapso de unos 0,2 segundos los bastoncitos crearán una postimagen. Su actividad inhibirá la señal amarilla de los conos: al cerebro se enviará una señal azul (complementario del amarillo). Es decir, por interferencia con los conos, el fantasma creado por los bastoncitos aparece coloreado de azul. Pero esa tenue coloración se perderá si los bastoncitos se saturan, tal como ocurre cuando se forma una postimagen instantánea. Esta conclusión la he comprobado buscándole un fantasma a una luz estímulo naranja inmediatamente después de crear una postimagen instantánea. Aquí vi la luz naranja sin fantasma.

Daniel H. Kriegman e Irving Biederman, de la Universidad estatal de Nueva York, han investigado recientemente la información disponible en torno a la postimagen instantánea. En los comienzos, ciertos estudiosos comprobaron el recuerdo de un observador tras entrever un despliegue de 12 letras. Normalmente, un observador no recuerda más de tres o cuatro letras. Las demás se pierden porque la imagen visual se desvanece enseguida y porque la memoria es insuficiente.

Kriegman y Biederman se plantearon si la retención mejoraría adaptando el observador a la oscuridad y mostrándole luego una ordenación de caracteres iluminada por un flash que disparase él mismo. La luminosidad la ajustaban con filtros grises colocados delante del flash.



4. Disposición ideada por Daniel H. Kriegman e Irving Biederman

Los grupos de caracteres los prepararon mecanografiando 14 consonantes y cifras en una ficha en blanco. Sus observaciones las grababa el observador en un magnetófono directamente de viva voz. Para evitar ambigüedades de pronunciación se prescindió de las cinco vocales y de la letra *Y*. También se eliminaron las letras *G*, *Q* y el cero por prestarse a confusiones visuales, así como la *B*, por ser labial muy parecida a la letra *P*.

Los grupos se mecanografiaron en tres filas, con cuatro caracteres la central y cinco la de abajo y la de arriba. Así, el espacio en blanco en la mitad de la fila central serviría de punto de fijación para el observador. Constituía allí un punto luminoso rojo pálido, producido por una linterna situada al otro lado de la ficha. Esa luz, demasiado tenue, no era suficiente para iluminar las letras.

En las experiencias tomaron parte seis sujetos. Cada una de estas personas se sentó a unos treinta centímetros de la ficha y se adaptó a la oscuridad durante unos 12 minutos. Luego, cada 30 segundos, se hacía una prueba de exposición y retentiva. Las 10 primeras pruebas de cada sesión y las tres primeras con cada filtro se destinaron a prácticas. Las pruebas consignadas con cada observador fueron cincuenta. En algunas secuencias éste comenzaba con el filtro más opaco progresando hacia el más claro. En otras, esa progresión era a la inversa.

Con los destellos más intensos se consiguieron las mejores retentivas. Asimismo éstas eran mejores en las secuencias iniciadas con el filtro más opaco. Con el filtro más claro los sujetos retuvieron hasta una media de 12,4 caracteres sobre los 14 del grupo. En nueve pruebas a la máxima luminosidad dieron una reseña perfecta. (El éxito pudiera en parte deberse, por supuesto, a la creciente familiaridad con los signos.)

Un recuerdo exacto y completo es obvio que requiere cierta práctica. Así, el observador debe mantener fija la vista con el fin de conservar la postimagen. Debe, además, desestimar las variaciones en la iluminación de la tarjeta que puedan de suyo interferir con la lectura de los símbolos. Concentrándose adecuadamente los sujetos fueron capaces de leer los caracteres en la postimagen, aun cuando no los hubieran visto bien durante el destello inicial.

Al repetir yo esta experiencia con un montaje similar, me encontré con que leer los signos en la postimagen resulta algo chocante. Normalmente, para leer, movemos los ojos de un lado a otro de la página. Pero, con la postimagen, me vi obligado a fijar la mirada para no borrarla. No comprendo así cómo pude leer los caracteres laterales. De algún modo yo había adquirido una idea de lo que tenía delante y, con ello, pude reconocerlos. O sea, lo que desplazaba era mi concentración y no la vista.

Aún sigue valiendo la pena investigar en torno al fantasma de Bidwell. La estela fantasmagórica, ¿está realmente relacionada con la postimagen instantánea? ¿Qué produce los colores en el fantasma? ¿Por qué son incoloras las postimágenes instantáneas? ¿Por qué se debilitan o se borran cuando se mueven los ojos? ¿Por qué duran más si éstos sólo se someten a un campo visual difuso y parpadeante? Recibiré gustoso cualquier noticia de los lectores acerca de más averiguaciones relativas a este fenómeno.

Libros

Fuerza débil, ciencia novohispana, causalidad cuántica y entomología

Albert Bramon, Antonio Lafuente, Bernat Ancochea y J. Cuello

FIFTY YEARS OF WEAK-INTERACTION PHYSICS, por A. Bertin, R. A. Ricci y A. Vitale. Società Italiana di Fisica; Bolonia, 1984. Ha transcurrido medio siglo desde que Enrico Fermi formulara su famosa teoría sobre la radiación beta emitida por ciertos núcleos. Esta radiación, que actualmente contemplamos como fenómeno típico de las interacciones débiles, constituye una de las tres modalidades de radiactividad o desintegración nuclear descubiertas ya a finales del siglo pasado. Las otras dos modalidades, radiactividad alfa y gamma, ejemplarizan a su vez el resto de las interacciones o fuerzas relevantes en el microcosmos: las interacciones fuertes y electromagnéticas, respectivamente. Toda la dinámica de los núcleos atómicos, así como la variada fenomenología que hoy día conocemos de las partículas elementales, viene gobernada por estas tres interacciones fundamentales. El estudio teórico y experimental de las mismas y el desarrollo paralelo del formulismo físico-matemático capaz de describir estas interacciones (la teoría cuántica de los campos) han sido temas de capital importancia en la física de los últimos decenios. El libro que comentamos se ocupa de forma directa y exhaustiva de un bloque importante de dichos temas (las interacciones débiles de núcleos y de partículas) y, como veremos más adelante, ilustra elegantemente las conexiones existentes con otros (unificación de interacciones electrodébiles) y algunos aspectos clave del formulismo general subyacente, la teoría cuántica de campos.

La primera parte del volumen, más de medio millar de páginas, constituye un excelente libro de texto sobre interacciones débiles. Se inicia con una introducción de carácter histórico y general en la que se resumen los puntos fundamentales del tema y al que siguen nueve capítulos más. Cada uno de ellos contiene una exposición detallada y autoconsistente de los distintos tipos de procesos que tradicionalmente se distinguen dentro del marco de las interacciones débiles: transiciones nucleares, procesos (leptónicos, semileptónicos y no-leptónicos) entre partículas elementales, mezcla entre kaones neutros, procesos con bosones intermediarios W^+, W^- y Z, etcétera. Los autores de los distintos capítulos son físicos italianos que han investigado activamente y, por lo general, de forma muy destacada en los temas que tratan. Diríase que se han esforzado en compendiar todas aquellas cuestiones destinadas probablemente a mantener cierta vigencia durante el paso de los próximos años y que, al compendiarlas, lo han hecho con los conocimientos y la perspectiva del año 1984. Detalle, este último, de gran interés, ya que sólo en ese año y el anterior se confirmaban aspectos capitales de la teoría que iniciara Fermi medio siglo antes. El contenido del libro, que como reza su título aparece al cerrarse este período, adquiere por ello especial relevancia y solidez. Probablemente este es su mayor mérito.

Pero no el único. Efectivamente, después de esta primera parte, el libro contiene la reimpresión de cuarenta trabajos originales sobre interacciones débiles que abarcan los cinco decenios antes mencionados. El primero es lógicamente el trabajo original de Fermi que *Il Nuovo Cimento* publicó en 1934. Dos de los últimos describen el reciente descubrimiento de los bosones intermediarios $W^{\pm}$ y Z, descubrimiento que ha representado, para Carlo Rubbia, la concesión del último premio Nobel. El resto de los trabajos originales documentan histórica y detalladamente otros aspectos importantes de esta fértil línea de investigación. Cabe destacar los relativos al descubrimiento e identificación del mesón pi, a las primeras confirmaciones de la violación de la paridad, a las interacciones débiles en el nivel de los quarks y, finalmente, a la detección de corrientes neutras. Todos los trabajos de la colección contienen científicos italianos entre sus firmantes. Criterio de selección que, si bien puede considerarse adecuado dentro del marco de la Società Italiana di Fisica, resta cierta universalidad y completitud a la recopilación.

Como antes mencionábamos, este tratado de las interacciones débiles contiene además ideas de enorme interés para el resto de la física actual y que, consecuentemente, podrían interesar a un mayor número de físicos menos especializados. Una de ellas, a la que se dedica un capítulo de la primera parte, se refiere a la unificación de distintas interacciones. Más concretamente se discute el modelo estándar o de Glashow-Weinberg-Salam que unifica las interacciones electromagnéticas con las débiles y que, en cierto sentido, abre las puertas a ulteriores unificaciones. Con ello la física avanzaría en una de sus direcciones preferidas: la de ampliar el conjunto de fenómenos descritos dentro de un marco único y económico en hipótesis. Otra idea a destacar es la contenida y desarrollada en el trabajo de Fermi, pórtico de la segunda parte del volumen. Representa posiblemente la más clara y primordial aplicación del formalismo básico (creación y aniquilación de partículas) de la teoría cuántica de campos a un caso específico. Lo mismo cabe afirmar de otro concepto clave de dicha teoría: la conexión entre partículas y los *quanta* de los campos o interacciones. Los bosones W y Z que antaño eran sólo los *quanta* de las interacciones débiles, también son desde hace un par de años partículas reales, con la masa y características previstas. Un éxito de la teoría cuántica de campos profusamente ilustrado en el libro que nos ocupa.

En resumen, se trata de algo más que de un buen texto, exhaustivo y actual, sobre la física de las interacciones débiles que debería interesar a los expertos en la materia. Se trata también de un texto en el que aparecen destacadas otras ideas y aspectos clave de la física moderna que lo hacen interesante y atractivo para no especialistas. Contiene, además, una amplia recolección de trabajos originales que le confieren cierto valor histórico. En este último sentido constituye una verdadera cantata a la importante física moderna italiana: la que iniciara Enrico Fermi en 1934 con su trabajo titulado "Tentativo di una teoria dei raggi beta". Importancia que este humilde título no dejaba ni siquiera vislumbrar. (A. B.)

EL DESPERTAR CIENTÍFICO EN AMÉRICA. LA VIDA DE DIEGO GARCÍA DE PALACIO, por Othón Arróniz. Universidad Autónoma Metropolitana; Méxi-

co, 1980. El libro que comentamos es una biografía de Diego García de Palacio con algunas interesantes pinceladas sobre el clima intelectual que le rodeó y la situación colonial de Nueva España a finales del siglo XVI. Contiene dos partes claramente diferenciadas: la segunda (pp. 139-223) es una mera reproducción de documentos de archivo quizá demasiado exhaustiva. La primera comienza con una breve descripción del ambiente científico novohispano (pp. 11-25), que da paso a dos extensos capítulos destinados a analizar la obra de García de Palacio (pp. 27-61) y describir los hitos biográficos más significativos (pp. 63-138). Si bien este capítulo, sin duda la parte más interesante y conseguida del libro, enmarca la vida del protagonista en el contexto de la época permitiendo comprender mucho de lo ocurrido en la colonia, el análisis que se realiza de su producción científica creemos que es muy endeble y escasamente original, según puede comprobarse de la lectura de las obras anteriores de Gervasio de Artiñano y de Galdácano, Fernández de Navarrete, Fernández Duro o Guillén Tato. Las primeras páginas, en cambio, además de intentar justificar tan atrayente título, proporcionan un significativo conjunto de sugerencias que ayudan a comprender las razones que hicieron posible lo que el autor viene en llamar "despertar científico en América". Lamentamos que no se haya efectuado un análisis más profundo de las razones históricas –económicas, sociales y políticas–, y se limite a los argumentos meramente culturales. Sin embargo, es justo señalar que otros autores, como Germán Somolinos D'Artois o Xavier Lozoya, se habían ya ocupado de figuras o temas coetáneos, pero sin aventurar ninguna tesis sobre tan importante asunto.

A partir del último tercio del quinientos, varias circunstancias, para el autor sólo fortuitas, coincidirán para que la ciudad de México acoja a un importante y cualificado grupo de científicos que junto a una serie concatenada de acontecimientos provocarán un despegue sin precedentes de la cultura novohispana. A partir de 1570 podemos encontrar en dicha ciudad, definitivamente establecidos o con estancias prolongadas, a Juan de Barrios, Agustín Farfán, Juan de Cárdenas, Alonso López de Hinojosos, Juan de la Fuente, Francisco Bravo, Diego García de Palacio, Juan Escalante de Mendoza, Juan de Córdoba, Francisco Cervantes de Salazar, Bernal Díaz del Castillo, Francisco Hernández... Junto a ellos, dos impresores franceses, Juan de Orchate y Antonio Ricardo, resueltamente comprometidos en la tarea de dar a conocer las obras escritas por aquéllos. Aunque no son muchos los datos de que disponemos, hay suficientes como para suponer contactos entre ellos, vehiculados incluso a través de una tertulia que se realizaba en la casa de Orchate. Así, por ejemplo, Othón Arróniz al describir el proceso inquisitorial contra el impresor normando por proposiciones heréticas nos habla de una tertulia a la que asistía Juan de la Fuente, primer catedrático de Medicina en Indias y maestro de Farfán, Cádenas o López de Hinojosos, y años más tarde protegido por el todopoderoso Diego García de Palacio.

Varios acontecimientos de indudable repercusión social y política apiñarán a estos hombres en torno a cuestiones que requerían solución urgente. Casi coincidentes en el tiempo sobrevinieron la feroz crisis epidémica de cocolixtli de 1576 y la no menos inquietante presencia del pirata Francis Drake en los mares del Sur. La llegada a México, comisionado para el estudio e inventario de las "cosas de Indias", de Francisco Hernández con el título de Protomédico americano, habría de coadyuvar. La experiencia acumulada, la gran cantidad de disecciones anatómicas realizadas bajo la supervisión de Hernández, tendrá por resultado la publicación de las obras de Juan de Cárdenas (*Problemas y secretos maravillosos de Indias,* 1591), Alonso López de Hinojosos (*Suma y recopilación de cirugía,* 1578) y Agustín Farfán (*Tratado Breve de Anathomía y Astrología*, 1579), todas salidas de las prensas de Orchate o Ricardo. Libros que por su carácter didáctico pudieron ser el soporte para las enseñanzas que Juan de la Fuente impartía en su cátedra de medicina.

El acoso de Drake en las costas del Pacífico, conducirá a Diego García de Palacio a alcanzar los honores de capitán general de la armada en la lucha contra el pirata y la dirección del astillero de Realejo (Guatemala) para construir los galeones de 400 y 500 toneladas. El jurista santanderino que había comenzado su aventura en Indias como oidor en la Audiencia de Guatemala (1572-74) y en la de Santiago de los Caballeros (1574-78), obtenía simultáneamente la alcaldía del crimen de México (1578) y este importante encargo del virrey.

La presencia de Hernández y Escalante de Mendoza, la llegada de un importante cargamento de libros procedente de la metrópoli, la fundación de la facultad de medicina, la crisis epidémica y la enorme cantidad de autopsias que hubieron de realizarse, la necesidad de emplear remedios naturales del lugar y el subsiguiente inventario de plantas y usos terapéuticos autóctonos, la movilización de tropas, las actividades desarrolladas en el arsenal del Realejo, el compromiso de Orchate y Ricardo para dar a conocer en sus prensas la cultura científica mexicana..., son algunos de los acontecimientos y circunstancias desencadenantes de esta explosión de la cultura novohispana.

Diego García de Palacio contribuiría a ella con la publicación de los *Diálogos militares* (1583), tratado de táctica, estrategia y armamento especialmente famoso por las páginas dedicadas a la construcción y uso de la artillería, y la *Instrucción náuthica* (1587), primer impreso castellano sobre construcción naval. Escritas ambas en forma de diálogos entre un montañés y un vizcaíno ingenuo, ignorante y buen práctico en la mar, aborda todos los temas clásicos en los antiguos *Regimientos* de navegación: tablas de declinación del sol y uso de instrumentos náuticos (libro I); cálculo de mareas, estima del rumbo, calendario... (libro II); carta de marear, pronósticos meteorológicos (curiosamente, según reglas astrológicas), tablas de la luna calculadas para el meridiano de México y arregladas al nuevo calendario gregoriano... (libro III). El libro IV encierra, sin duda, la más importante novedad ya que es un tratado de construcción y armamento naval, pertrechos, oficios a bordo... de buques útiles para la guerra y el comercio. Othón Arróniz, sorprendido por los conocimientos de este jurista, dedicará algunas páginas a explicar cuáles podrían ser las fuentes y los orígenes de la *Instrucción*. Pero convencido de la capacidad de su biografiado, construye un entramado que aboca a la conclusión de que García de Palacio aprovechó, como tantos otros, el manuscrito de Juan Escalante de Mendoza, *Itinerario de los Mares del Mundo* (1575). Es conocido el hecho de que la obra de Escalante no fue autorizada por el Consejo de Indias para ser impresa debido a que contenía la noticia detallada de derroteros para viajar a las colonias. Según Arróniz, algunas coincidencias y la más que sospechosa catadura ética de Palacio avalarían la hipótesis del plagio. Sea como fuere, lo cierto es que la *Instrucción náuthica* presenta novedades que la siguen haciendo acreedora de una atención privilegiada en la historia

de la ciencia y la cultura española y americana. Las proporciones que da para la nao de 400 toneladas no son las mismas que propuso Escalante, pero además la inclusión de los planos y del *Vocabulario de los nombres que usa la gente de mar*, destacado intento de inventariar más de 500 términos marineros, constituyen una aportación original de verdadera importancia.

Quizá para terminar, quisiera felicitar a O. Arróniz por este reposado trabajo tan lleno de sugerencias y que tantos datos inéditos e incontestables presenta sobre la obra y la vida de Diego García de Palacio. Querría también insistir en la importancia indudable de un estudio más general sobre esas tres décadas finales del siglo XVI en México. Tarea en la que ya le supongo comprometido y que espero ver concluida pronto. (A. L.)

CULTURA EN WEIMAR, CAUSALIDAD Y TEORÍA CUÁNTICA, 1918-1927, por Paul Formann. Alianza Editorial; Madrid, 1984. Este libro es la traducción al castellano de un trabajo de Paul Formann publicado en 1971 en el tercer volumen de la revista "Historical Studies in the Physical Sciences", la primera que se dedicó preferentemente a la historia de la física. Se trataba del primer intento serio de construir una historia de la ciencia moderna en la que tuviesen cabida las influencias culturales de la época en la que surge una teoría científica. Al margen de su contribución a la historia "externa" o social de la ciencia, el ensayo de Formann es un ejemplo del creciente abandono de los grandes análisis y síntesis de carácter filosófico en favor de estudios concretos de situaciones históricas y culturales particulares. El trabajo se convirtió inmediatamente en un clásico de la historiografía de la física.

En su libro "The conceptual development of quantum mechanics", Max Jammer sostenía que "ciertas ideas filosóficas de finales del siglo XIX no sólo prepararon, sino que también contribuyeron decisivamente a configurar el clima intelectual para la formación de las nuevas concepciones de la moderna teoría cuántica". Para Formann, sin embargo, expresiones como "prepararon el clima intelectual para" resultan vagas y equívocas. Hay que insistir, opina Formann, en un análisis causal en el que se demuestren las circunstancias y las interacciones que hacen que los científicos se vean arrastrados por corrientes intelectuales. Entre un análisis "psicológico", que considera la estructura mental de cada científico involucrado, o uno "sociológico", que trata la postura mental actual como una respuesta socialmente determinada por el medio ambiente intelectual inmediato, Formann opta por este último por considerarlo como el más general y provechoso, a pesar de que pueda resultar tosco el resaltar la presión social e ignorar las inquietudes emocionales.

En el capítulo I, "La cultura de Weimar como un medio ambiente intelectual hostil", Formann refiere cómo el final inesperado de la primera guerra mundial –que, en Alemania, muchos creían victorioso en el verano de 1918, y que se convirtió en completa derrota en el otoño– hizo que los científicos "exactos" se encontraran ante una escala de valores públicos drásticamente transformada. Aun sin tener testimonio explícito de este efecto, Formann lo infiere del tono defensivo de los discursos que pronunciaban aquellos científicos ante audiencias universitarias. La imagen general del medio ambiente intelectual en el período de Weimar es la de un rechazo de la razón como instrumento epistemológico, debido a su vínculo inseparable con el materialismo-mecanismo-positivismo, y una glorificación de la "vida", de la intuición, de la experiencia –ni mediatizada, ni analizada–. El objeto real de la actividad científica debe ser la aprehensión inmediata de los valores y no la disección del nexo causal. Existía, por otra parte, un sentimiento generalizado de crisis, especialmente opresor en medios académicos. No se trataba solamente de una crisis económica y política sino, fundamentalmente, de una crisis moral e intelectual, una crisis de ciencia y saber. En este sentido, el libro de Oswald Spengler "Der untergang des Abendlandes" ("La decadencia de Occidente") trata la física y la matemática junto al arte, la música y la religión como condicionadas culturalmente. Leída por todo el mundo universitario, las reacciones eran muy contrapuestas. Ernst Troeltsch la llegó a clasificar de "significativo documento cultural de una época de crisis espiritual de la ciencia alemana".

En el capítulo II, "Adaptación de la ideología al medio ambiente intelectual", Formann explora algunos aspectos de la respuesta, desde el plano ideológico de los científicos ante el conjunto de actitudes compendiado por Spengler, explícitamente hostil a las ciencias exactas y a los conceptos específicos empleados en ellas. Formann habla, por un lado, de "ansia de crisis" por parte de los científicos y, por otro, de una "retórica de la crisis" cuando matemáticos y físicos se dirigen a una audiencia universitaria general. De este modo, la noción de crisis se convierte no sólo en un "cliché", sino también en "entrée", una garantía para establecer una relación entre el científico y sus oyentes. Respecto de la física, la "crisis de la vieja teoría cuántica" agobiaba a los físicos atómicos, especialmente a los alemanes, en los años que precedieron a la introducción de la mecánica cuántica en 1925-26. En opinión de Formann, la posibilidad de la citada crisis dependía del propio afán de crisis que experimentaban por entonces los físicos y que surgía de su participación y adaptación al medio ambiente intelectual de Weimar.

Tras una introducción sobre el principio de causalidad, el tercer y último capítulo –titulado "Prescindiendo de la causalidad"– analiza las "conversiones" a la acausalidad que se van produciendo durante el período 1919-25, desde las de Franz Exner y Hermann Weyl hasta las más tardías de Erwin Schrödinger y Hans Reichenbach. Frente a estas posiciones, se hallan las de quienes sentían que se estaba traicionando, inconscientemente, a la profesión, entre ellos figuras como Max Plank y Albert Einstein.

Después de estos tres niveles de discusión, la conclusión de Formann es que los físicos alemanes "repentinamente desprovistos, debido a un cambio de los valores públicos, de la aprobación y prestigio de que habían disfrutado antes y durante la primera guerra mundial, se vieron impulsados a alterar su ideología, e incluso el contenido de su ciencia, para recobrar así una imagen pública favorable". Muchos decidieron que debían desembarazarse del "albatros de la causalidad". Para Formann, los problemas sustanciales de la física atómica sólo desempeñaron un papel secundario en la génesis de la percepción acausal. El factor más importante fue la presión socio-intelectual ejercida sobre los físicos en cuanto miembros de la comunidad académica alemana.

En este libro se nos presenta lo que hoy se conocen como "tesis de Formann", y no puede negarse que su lectura sorprende y cautiva a la vez. En primer lugar, estas tesis están cuidadosamente discutidas y elaboradas. La argumentación va conduciendo poco a poco hacia la conclusión final del trabajo. En segundo lugar, son tesis realmente originales para quien no está fa-

miliarizado con un análisis "externo" de la historia de la ciencia. En este tipo de análisis se estudian muy especialmente medios y factores económicos o políticos, organizaciones, publicaciones e instituciones, o la influencia de valores culturales. La lectura debe hacerse, por tanto, con sentido crítico a medida que se sigue la argumentación. Con esta disposición previa, el libro resulta muy interesante.

Hay que hacer un elogio a la cuidada traducción de José Manuel Sánchez-Ron. Este ha incluido una introducción en la que –en sus propias palabras– se intenta orientar y facilitar la tarea de todos aquellos lectores interesados en la historia de la física contemporánea y que, sin embargo, no disponen de las facilidades necesarias. Al final del libro se incluye también una interesantísima "Guía bibliográfica para la historia de la física moderna" con una lista de publicaciones dedicadas a la historia de la física del siglo XX, recopilada por el propio Sánchez-Ron. (B. A.)

INTRODUCCIÓN A LA ENTOMOLOGÍA, por M. G. de Viedma, J. R. Baragaño y A. Notario. Editorial Alhambra; Madrid, 1984. Desde los tiempos pioneros de Mariano de la Paz Graells (1809-1898) y Laureano Pérez Arcas (1824-1894) la entomología ibérica parece haber pasado por sucesivos altibajos. En primer lugar habría que destacar un reducido, aunque muy emprendedor, grupo de entomólogos catalanes autores de los primeros catálogos faunísticos, entre los cuales merecen citarse los *Apuntes para la geografía y fauna entomológicas de Mataró*, de J. Salvañá (Madrid, 1870), el *Catálogo metódico y razonado de los lepidópteros...* y el *Catálogo metódico y razonado de los coleópteros...* publicados esta vez en Barcelona en 1874 y 1876. Sin embargo, en la misma época (su *Sinopsis de los Ortópteros de España y Portugal* es también de 1876) inicia su labor Ignacio Bolívar (1850-1944) cuya trascendencia iba a ser mucho mayor, dada su capacidad dinamizadora, no sólo en el ámbito de su especialidad sino en la entomología en su conjunto y aún en la renovación total del estudio de las ciencias biológicas en España. Ya en el presente siglo la entomología siguió el empuje de Bolívar en torno de la Sociedad Española de Historia Natural y del Museo de Madrid (trabajos de Fernández Nonídez, *Fauna ibérica de los Himenópteros* de García Marcet, en 1921 y otros), o también en torno del Museo de Ciencias Naturales de Barcelona, en donde destacaron Ascensi Codina (1877-1932) e Ignacio de Segarra (1889-1940), o figuras extranjeras como Orazio Querci, que publicó aquí su *Contributo alla cognoscenza della biologia dei roplacori iberici* (1932). Todo aquel trabajo de los años veinte y treinta pareció quedar resumido en la celebración, en Madrid, en 1935 del Congreso Internacional de Entomología, antes de iniciarse el largo declive.

Tras la guerra civil la primera obra importante es la del ingeniero de montes Gonzalo Ceballos, *Elementos de Entomología General*, publicada por primera vez en 1952, muchos años antes de que la entomología tomara su actual auge y se multiplicaran estudios y aficiones.

La obra de Viedma, Baragaño y Notario contiene una revisión histórica de la clasificación de los insectos escueta aunque completa: desde Aldrovandi –quien en 1602 basaba su criterio de clasificación en la morfología de patas y alas y dividía los insectos en terrestres y acuáticos– hasta las revisiones actuales de familias y órdenes. Cada capítulo va acompañado de ilustraciones, realizadas para la obra por uno de sus autores (Baragaño). Suman más de doscientos grabados, si hemos de contar las figuras que se agregan a las claves.

La introducción describe pormenorizadamente la morfología externa de los insectos. El capítulo segundo lo constituye la mentada revisión histórica, que finaliza con la exposición de la clasificación –hasta familia– adoptada por los autores, y que es –por lo que a sus grandes líneas se refiere– básicamente la de Grassé e Imms (1957), y la de Imms, Bourgogne y Brock en la subdivisión de algunos órdenes más "poblados". Viedma, Baragaño y Notario postulan un *sistema* de los insectos con 29 órdenes con una distribución bastante conservadora de familias y superfamilias

Este elenco de 29 órdenes queda así agrupado en dos subclases: Apterygota (insectos ápteros sin metamorfosis o con metamorfosis ligera), que comprenden cuatro órdenes (Thysanura, Diplura, Protura y Collembola) y la subclase Pterygota (insectos alados o secundariamente ápteros con metamorfosis variada, aunque raramente ligera o ausente). Esta segunda subclase se distribuye en dos divisiones: Exopterygota y Endopterygota. La división I (Exopterygota) se caracterizaría por su metamorfosis simple, ausencia de estado pupal y desarrollo de las alas en el exterior del cuerpo. Comprende los órdenes 5 al 20: Ephemeroptera, Odonata, Plecoptera, Gylloblattodea, Orthoptera, Phasmida, Dermaptera, Embioptera, Dictyoptera, Isoptera, Zoraptera, Psocoptera, Mallophaga, Siphunculata, Hemiptera y Thysanoptera. Por su parte, la división II o Endopterygota se caracterizaría por sus metamorfosis complicadas, presencia de estado pupal y desarrollo de las alas en el interior del cuerpo. Comprende los órdenes 21 al 29: Neuroptera, Mecoptera, Lepidoptera, Yrichoptera, Diptera, Siphonaptera, Hymenoptera, Coleoptera y Strepsiptera.

Este conservadurismo se refleja en algunos compromisos, que reconocen los propios autores: "agrupar Blattaria y Mantoidea en Dictyoptera, con categoría de subórdenes. No reconocer categoría ordinal ni a Sialoidea, ni a Raphidioidea, que tratamos como superfamilias de Neuroptera. Incluir Zeugloptera de Chapman (1917) como una superfamilia Mycropterygoidea, en Lepidoptera e incluir Strepsiptera como una superfamilia Stylopoidea en Coleoptera. Por otro lado se aceptan los órdenes Hemiptera y Homoptera, particularmente por razones de claridad y conveniencia". No hace falta ser un especialista en rama alguna de la entomología para percibir todo el significado del compromiso que supone admitir el primer y el último de los ejemplos citados: cucarachas y mántidos en el antiguo grupo Dictyoptera o los más artificiales grupos de Homoptera y Hemiptera. Por otra parte y como dice M. R. Gómez Bustillo, este prudente conservadurismo se deja notar al no haber adoptado las posicines de Common, Friese Heppner, Falkovitsh, Davis, entre otros, por lo que respecta al ordenamiento de grupos como Lepidoptera.

El capítulo tercero contiene una clave para la determinación de los órdenes de los insectos, en la que merece destacar la inclusión de los matices suficientes como para permitir situar correctamente numerosas "excepciones". La parte central del libro, sin embargo, reside en el capítulo cuarto: "Los órdenes de los insectos". Allí, para cada orden, se expone la etimología y nombre vulgar, número de especies, tamaño, coloración, hábitat, alimentación, caracteres distintivos y clasificación.

Cierran la obra un muy cuidado glosario de entomología en el que de un modo breve se definen más de trescientos términos de la especialdiad y una bibliografía amplia presentada por secciones: entomología general, clasificación, nomenclatura e identificación, sistemática, etcétera. (J. C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MECANISMO DE NODULACION DE LAS LEGUMINOSAS

THE *RHIZOBIUM*. LEGUME SYMBIOSIS. J. E. Beringer, N. Brewin, A. W. B. Johnston, H. M. Schulman y D. A. Hopwood en *Proc. R. Soc. London Ser. B.*, n.° 204, págs. 219-233; 1979.

MOLECULAR GENETICS OF SYMBIOTIC NITROGEN FIXATION. F. M. Ausubel en *Cell*, vol. 29, n.° 1-2.

RHIZOBIUM INFECTION: A BENEFICIAL PLANT DISEASE? C. P. Vance en *Ann. Rev. Microbiol.*, vol. 37, págs. 399-424; 1983.

THE MOLECULAR GENETICS OF *RHIZOBIUM*-LEGUME SIMBIOSIS. Preparado por D. P. S. Verma y S. Long. *International Review of Cytology Suppl. 14*, págs. 211-245. Academic Press.

ASI CAMBIA *TRYPANOSOMA* SU CUBIERTA

BIOCHEMISTRY OF THE VARIANT SURFACE GLYCOPROTEINS OF SALIVARIAN TRYPANOSOMES. M. J. Turner en *Advances in Parasitology*, vol. 21, págs. 69-153; 1982.

BID THE SICKNESS CEASE—DISEASE IN THE HISTORY OF BLACK AFRICA. Oliver Ransford. John Murray, Ltd., 1983.

6 Å-RESOLUTION X-RAY STRUCTURE OF A VARIABLE SURFACE GLYCOPROTEIN FROM *TRYPANOSOMA BRUCEI*. D. M. Freymann. P. Metcalf, M. Turner y D. C. Wiley en *Nature*, vol. 311, n.° 5982, págs. 167-169; 13 de septiembre de 1984.

FUENTES EXPLOSIVAS DE RAYOS GAMMA

PROBABLE OPTICAL COUNTERPART OF A GAMMA-RAY BURSTER. B. E. Schaefer en *Nature*, vol. 294, n.° 5843, págs. 722-724; 24 de diciembre de 1981.

THE GAMMA-RAY BURSTER PUZZLE. Ronald A. Schorn en *Sky and Telescope*, vol. 63, n.° 6, págs. 560-562; junio, 1982.

HIGH ENERGY TRANSIENTS IN ASTROPHYSICS. Dirigido por S. E. Woosley. American Institute of Physics Conference Proceedings n.° 115, 1984.

EL MOVIMIENTO BROWNIANO

SELECTED PAPERS ON NOISE AND STOCHASTIC PROCESSES. Dirigido por Nelson Wax. Dover Publications, Inc., 1954.

INVESTIGATIONS ON THE THEORY OF THE BROWNIAN MOVEMENT. Albert Einstein, preparado por R. Fürth y traducido por A. D. Cowper. Dover Publications, Inc., 1956.

DYNAMICAL THEORIES OF BROWNIAN MOTION. Edward Nelson. Princeton University Press, 1967.

EXITO REPRODUCTOR EN EL CIERVO COMUN

THE THEORY OF SEX ALLOCATION. E. L. Charnov. Princeton University Press, 1982.

MATERNAL DOMINANCE, BREEDING SUCCESS AND BIRTH SEX RATIONS IN RED DEER. T. H. Clutton-Brock, S. D. Albon y F. E. Guinness en *Nature*, vol. 308, n.° 5957, págs. 358-360; 22 de marzo de 1984.

RADARES DE BARRIDO ELECTRONICO

RADAR TECHNOLOGY. Dirigido por Eli Brookner. Artech House, Inc., 1977.

RADAR DE IMÁGENES LATERALES AEROTRANSPORTADO. Homer Jensen, L. C. Graham, Leonard J. Porcello y Emmett N. Leith en *Investigación y Ciencia*, n.° 15, págs. 55-65; diciembre, 1977.

INTRODUCTION TO RADAR SYSTEMS. Merrill I. Skolnik. McGraw-Hill Book Company, 1980.

TRENDS IN RADAR SIGNAL PROCESSING. Eli Brookner en *Microwave Journal*, vol. 25, n.° 10, págs. 20-39; 1982.

RADAR DETECTION AND TRACKING SYSTEMS. S. A. Hovanessian. Artech House, Inc., 1983.

SUSTITUCION FUNCIONAL DEL OIDO

PLACE AND TIME CODING OF FREQUENCY IN THE PERIPHERAL AUDITORY SYSTEM: SOME PHYSIOLOGICAL PROS AND CONS. E. F. Evans en *Audiology*, vol. 17, n.° 5, págs. 369-420; septiembre/octubre, 1978.

NEURAL PROSTHESES. Gerald E. Loeb, John McHardy, Ellen M. Kelliher y S. Barry Brummer en *Biocompatibility in Clinical Practice: Vol. 2*, dirigido por David F. Williams. CRC Press, Inc., 1982.

CLINICAL APPLICATIONS OF NEURAL PROSTHETIC TECHNIQUES. F. T. Hambrecht en *Applied Neurophysiology*, vol. 45, n.° 1-2, págs. 10-17; enero-abril, 1982.

COCHLEAR PROSTHESES: AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM. Dirigido por Charles W. Parkins y Samuel W. Anderson en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 405; 1983.

DESIGN AND FABRICATION OF AN EXPERIMENTAL COCHLEAR PROSTHESIS. G. E. Loeb, C. L. Byers, S. J. Rebscher, D. E. Casey, M. M. Fong, R. A. Schindler, R. F. Gray y M. M. Merzenich en *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 21, n.° 3, págs. 241-254; mayo, 1983.

ACEROS DE DAMASCO

ON THE BULAT —DAMASCUS STEELS REVISITED. Jeffrey Wadsworth y Oleg D. Sherby in *Progress in Materials Science*, vol. 25, págs. 35-68; 1980.

DAMASCUS STEEL-MAKING. Jeffrey Wadsworth y Oleg D. Sherby en *Science*, vol. 218, n.° 4570, págs. 328-329; 22 de octubre de 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

ADVANCED DUNGEONS AND DRAGONS: MONSTER MANUAL. Gary Gygax y Greg Irons. Troubadour Press, 1979.

I CHING: BOOK OF CHANGES. Traducido al inglés por James Legge. Citadel Press, 1983.

ROG-O-MATIC: A BELLIGERENT EXPERT SYSTEM. Michael Mauldin, Guy Jacobson, Andrew Appel y Leonard Hamey. Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pa.; 1983.

TALLER Y LABORATORIO

HOW MANY LETTERS IN BIDWELL'S GHOST? AN INVESTIGATION OF THE UPPER LIMITS OF FULL REPORT FROM A BRIEF VISUAL STIMULUS. Daniel H. Kriegman e Irving Biederman en *Perception & Psychophysics*, vol. 28, n.° 1, págs. 82-84; 1980.

WORKSHOPS IN PERCEPTION. R. P. Power, S. Hausfeld y A. Gorta. Routledge & Kegan Paul, 1981.

THE DELAYED ROD AFTERIMAGE. Edward H. Adelson en *Vision Research*, vol. 22, págs. 1313-1328; 1982.